ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
ВСЕРОССИЙСКИЙ ИНСТИТУТ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ
РАСТЕНИЙ ИМЕНИ Н.И. ВАВИЛОВА (ВИР)

ТРУДЫ ПО ПРИКЛАДНОЙ БОТАНИКЕ, ГЕНЕТИКЕ И СЕЛЕКЦИИ, том 186 выпуск 3

(основаны Р. Э. Регелем в 1908 г.)

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2025

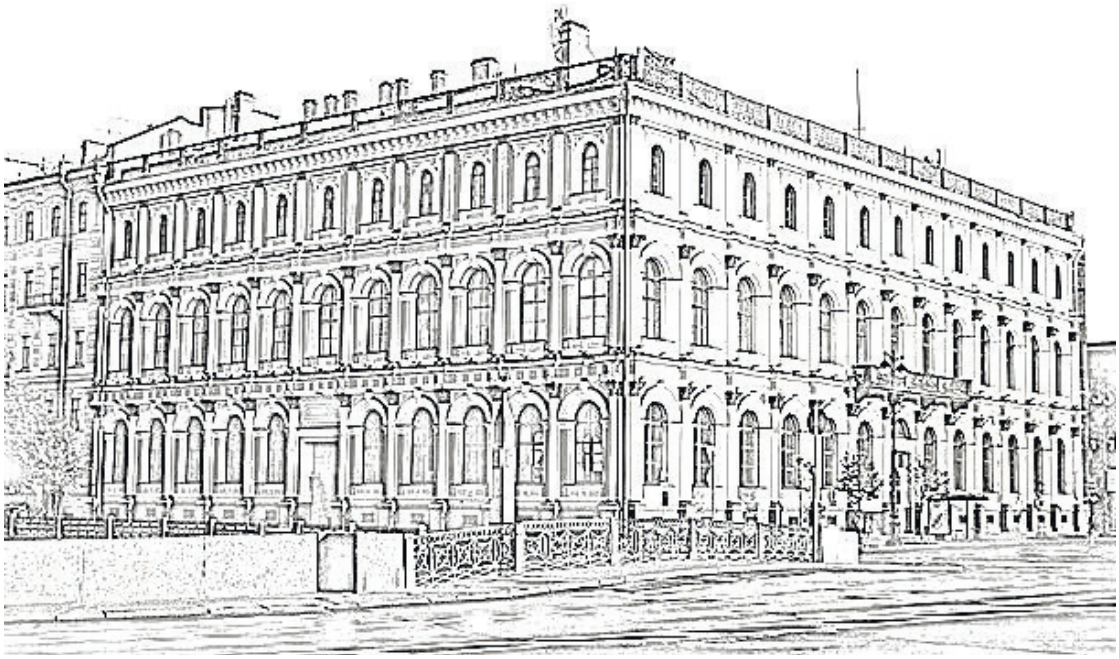
PROCEEDINGS ON APPLIED BOTANY, GENETICS AND BREEDING, vol. 186 issue 3

(founded by Robert Regel in 1908)

ST. PETERSBURG
2025

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений
имени Н.И. Вавилова (ВИР)

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation
Federal Research Center
the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR)



ISSN 2227-8834 (Print)
ISSN 2619-0982 (Online)

Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции

2025 Том 186 выпуск 3

DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3
https://elpub.vir.nw.ru

Научный рецензируемый журнал
Издается с 1908 г.

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77 - 57455 от 27.03.2014
Учредитель: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова» (ВИР)
Адрес учредителя: Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 42, 44

Главный редактор
Хлесткина Елена Константиновна, д-р биол. наук, профессор РАН, член-корреспондент РАН (Россия)

Заместители главного редактора
Вишнякова Маргарита Афанасьевна, д-р биол. наук (Россия)
Лоскутов Игорь Градиславович, д-р биол. наук (Россия)
Митрофанова Ольга Павловна, д-р биол. наук (Россия)

Ответственный секретарь
Шипилина Лилия Юрьевна, канд. биол. наук (Россия)

Редакционная коллегия
Анисимова Ирина Николаевна, д-р биол. наук (Россия)
Брач Нина Борисовна, д-р биол. наук (Россия)
Бурляева Марина Олеговна, канд. биол. наук (Россия)
Гавриленко Татьяна Андреевна, д-р биол. наук (Россия)
Голохваст Кирилл Сергеевич, д-р биол. наук, профессор РАН (Россия)
Горина Валентина Милентьевна, д-р с.-х. наук (Россия)
Добровольская Оксана Борисовна, д-р биол. наук (Россия)
Дорофеев Владимир Иванович, д-р биол. наук (Россия)
Думачева Елена Владимировна, д-р биол. наук (Россия)
Зотеева Надежда Мубаровна, д-р биол. наук (Россия)
Зуев Евгений Валерьевич, канд. с.-х. наук (Россия)
Корзун Виктор Николаевич, д-р биол. наук (Германия)
Матвеева Татьяна Валерьевна, д-р биол. наук (Россия)
Медведев Сергей Семенович, д-р биол. наук (Россия)
Мироненко Нина Васильевна, д-р биол. наук (Россия)
Митрофанова Ирина Вячеславовна, д-р биол. наук, член-корреспондент РАН (Россия)
Пороховинова Елизавета Александровна, д-р биол. наук (Россия)
Радченко Евгений Евгеньевич, д-р биол. наук (Россия)
Рашаль Исаак, д-р биол. наук, профессор (Латвия)
Родионов Александр Викентьевич, д-р биол. наук (Россия)
Силантьева Марина Михайловна, д-р биол. наук (Россия)
Соколова Диана Викторовна, канд. биол. наук (Россия)
Солодухина Ольга Владимировна, д-р биол. наук (Россия)
Тихонова Надежда Геннадьевна, канд. биол. наук (Россия)
Ткаченко Кирилл Гавриилович, д-р биол. наук (Россия)
Туруспеков Ерлан Кенесбекович, канд. биол. наук, профессор (Казахстан)
Ухатова Юлия Васильевна, канд. биол. наук (Россия)
Филипенко Галина Ивановна, канд. с.-х. наук (Россия)
Хатефов Эдуард Балилович, д-р биол. наук (Россия)
Чухина Ирена Георгиевна, канд. биол. наук (Россия)

Редакционный совет
Афанасенко Ольга Сильвестровна, д-р биол. наук, академик РАН (Россия)
Баталова Галина Аркадьевна, д-р с.-х. наук, академик РАН (Россия)
Бервийе Андре Жан, д-р (Франция)
Бёрнер Андреас, д-р (Германия)
Беспалова Людмила Андреевна, д-р с.-х. наук, академик РАН (Россия)
Голубец Войтех, д-р (Чехия)
Гончаров Николай Петрович, д-р биол. наук, академик РАН (Россия)
Дидерихсен Аксель, д-р (Канада)
Дука Мария Васильевна, д-р биол. наук, профессор, академик АН Молдовы (Молдова)
Еремин Геннадий Викторович, д-р с.-х. наук, академик РАН (Россия)
Кильчевский Александр Владимирович, д-р биол. наук, профессор, академик НАН Беларуси (Беларусь)
Левитин Марк Михайлович – д-р биол. наук, академик РАН (Россия)
Моргунов Алексей Иванович, канд. с.-х. наук (Казахстан)
Муминджанов Хафиз Абдувахобович, д-р биол. наук, профессор (Турция, Таджикистан)
Тихонович Игорь Анатольевич, д-р биол. наук, академик РАН (Россия)
Фризен Николай Вальтерович, д-р биол. наук, профессор (Германия)
Хаммер Карл, д-р, профессор (Германия)

© Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 2025

ISSN 2227-8834 (Print)
ISSN 2619-0982 (Online)

Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding

2025 Volume 186 issue 3

DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3
https://elpub.vir.nw.ru

Scientific Peer-Reviewed Journal
Founded in 1908

Founder: Federal Research Center
the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR)
Founder's address: 42, 44, Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190000, Russia

Editor-in-chief
Elena K. Khlestkina, Dr. Sci. (Biology), Professor of the RAS, Corr. Member of the RAS, Russia

Deputy editor-in-chief
Margarita A. Vishnyakova, Dr. Sci. (Biology), Russia
Igor G. Loskutov, Dr. Sci. (Biology), Russia
Olga P. Mitrofanova, Dr. Sci. (Biology), Russia

Executive secretary
Lilia Yu. Shipilina, Cand. Sci. (Biology), Russia

Editorial board
Irina N. Anisimova, Dr. Sci. (Biology), Russia
Nina B. Brutch, Dr. Sci. (Biology), Russia
Marina O. Burlyaeva, Cand. Sci. (Biology), Russia
Irena G. Chukhina, Cand. Sci. (Biology), Russia
Oxana B. Dobrovolskaya, Dr. Sci. (Biology), Russia
Vladimir I. Dorofeev, Dr. Sci. (Biology), Russia
Elena V. Dumacheva, Dr. Sci. (Biology), Russia
Galina I. Filipenko, Cand. Sci. (Agriculture), Russia
Tatjana A. Gavrilenko, Dr. Sci. (Biology), Russia
Kirill S. Golokhvast, Dr. Sci. (Biology), Professor of the RAS, Russia
Valentina M. Gorina, Dr. Sci. (Agriculture), Russia
Eduard B. Khatefov, Dr. Sci. (Biology), Russia
Viktor N. Korzun, Dr. Sci. (Biology), Germany
Tatyana V. Matveeva, Dr. Sci. (Biology), Russia
Sergey S. Medvedev, Dr. Sci. (Biology), Russia
Nina V. *Mironenko*, Dr. Sci. (Biology), Russia
Irina V. Mitrofanova, Dr. Sci. (Biology), Corr. Member of the RAS, Russia
Elizaveta A. Porokhovinova, Dr. Sci. (Biology), Russia
Evgeny E. Radchenko, Dr. Sci. (Biology), Russia
Īzaks Rašals, Dr. Sci. (Biology), Professor, Latvia
Aleksandr V. Rodionov, Dr. Sci. (Biology), Russia
Marina M. Silantyeva, Dr. Sci. (Biology), Russia
Diana V. Sokolova, Cand. Sci. (Biology), Russia
Ol'ga V. Soloduhina, Dr. Sci. (Biology), Russia
Nadezhda G. Tikhonova, Cand. Sci. (Biology), Russia
Kirill G. Tkachenko, Dr. Sci. (Biology), Russia
Erlan K. Turuspekov, Cand. Sci. (Biology), Professor, Kazakhstan
Yulia V. Ukhatova, Cand. Sci. (Biology), Russia
Nadezhda M. Zoteeva, Cand. Sci. (Biology), Russia
Evgeny V. Zuev, Cand. Sci. (Agriculture), Russia

Editorial council
Olga S. Afanasenko, Dr. Sci. (Biology), Full Member (Academician) of the RAS, Russia
Galina A. Batalova, Dr. Sci. (Agriculture), Full Member (Academician) of the RAS, Russia
André Jean Bervillé, Dr., France
Lyudmila A. Bespalova, Dr. Sci. (Agriculture), Full Member (Academician) of the RAS, Russia
Andreas Börner, Dr., Germany
Axel Diederichsen, Dr., Canada
Maria V. Duca, Dr. Sci. (Biology), Professor, Full Member (Academician) of the Academy of Sciences of Moldova, Republic of Moldova
Gennady V. Eremin, Dr. Sci. (Agriculture), Full Member (Academician) of the RAS, Russia
Nikolai Friesen, Dr. habil., Professor, Germany
Nikolay P. Goncharov, Dr. Sci. (Biology), Full Member (Academician) of the RAS, Russia
Karl Hammer, Dr., Professor, Germany
Vojtech Holubec (Vojtěch Holubec), Dr., Czech Republic
Alexander V. Kilchevsky, Dr. Sci. (Biology), Professor, Full Member (Academician) of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
Mark M. Levitin, Dr. Sci. (Biology), Full Member (Academician) of the RAS, Russia
Alexey I. Morgounov, Cand. Sci. (Agriculture), Kazakhstan
Hafiz Muminjanov, Dr. Sci. (Biology), Professor, Turkey, Tajikistan
Igor A. Tikhonovich, Dr. Sci. (Biology), Full Member (Academician) of the RAS, Russia

© Federal Research Center
the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 2025

УДК 58:575:631.522/.524:633/635:632(066)

Ответственные редакторы выпуска: *Хлесткина Елена Константиновна*, д-р биол. наук, профессор РАН, член-корреспондент РАН (Россия), *Соколова Елена Александровна*, д-р биол. наук (Россия)
Редактор-переводчик: *Крылов Антон Георгиевич* (Россия)

Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции / Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2025. Т. 186, вып. 3. 294 с.

Приведены результаты изучения и сохранения *in vitro* редкого исчезающего вида *Prunus armeniaca* L., а также девяти редких исчезающих растений семейства Rosaceae, представляющих ценность для сельского хозяйства, медицины и декоративного садоводства, в Казахстане. Описано пополнение гербарной коллекции ВИР из Франции и подконтрольных ей территорий в 20–30-е годы XX века. Изучено влияние начальной дозы азота при различных режимах орошения на урожайность нута сортотипа Кабули. Рассмотрены состояние и мировые тенденции выращивания сортов и селекционных форм различных видов актинидии. Выявлено влияние инокуляции штаммами ризобактерий микрорастений земляники *in vitro* на их стрессовый ответ при культивировании *ex vitro* в условиях гидропоники. Определена изменчивость параметров цвета зерна местных сортов кукурузы Азербайджана. Рассмотрено негативное влияние интрогрессии в хромосому 5AL мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) от тетраплоидной пшеницы (*Triticum timopheevii* (Zhuk.) Zhuk. subsp. *timopheevii*) на устойчивость к засухе и продуктивность. Предложена методика определения качества волокна льна по малым пробам с использованием универсальной разрывной машины Instron 5943. Установлена взаимосвязь между морфологическими признаками и урожайностью семян кресс-салата в двух экологических условиях Ирана. Дана селекционная оценка гибридов *Olea europaea* L. Никитского ботанического сада. Исследовано влияние дополнительного УФ-А-облучения на биохимические и морфометрические показатели картофеля в условиях защищенного грунта. Проведен анализ селекционного потенциала образцов гуара из коллекции ВИР в условиях Российской Федерации. Изучены биологически активные вещества в клубнях топинамбура (*Helianthus tuberosus* L.) из коллекции ВИР. Обсуждается закон Вавилова в эпоху секвенирования нового поколения (ответы, загадки, подсказки). Рассмотрено использование доноров раннеспелости в селекции кукурузы в условиях степной зоны Северо-Кавказского федерального округа России. Описан новый сорт пайзы (*Echinochloa frumentacea* Link) кормового направления для Западной Сибири. Вид *Triticum ispahanicum* Heslot проанализирован как генетический ресурс для улучшения вида *T. aestivum* L. Проведена систематизация национальной коллекции груши Института плодоводства Беларуси с использованием набора SSR-маркеров, рекомендованного ECPGR. Как национальная инновация Марокко охарактеризовано создание двух гексаплоидных сортов овса (*Avena sativa* L.) пищевого назначения с высокой питательной ценностью крупы. Выявлена устойчивость образцов ячменя из Восточноазиатского центра разнообразия культуры к net- и spot-формам возбудителя сетчатой пятнистости. Исследована резистентность интрогрессивных образцов мягкой пшеницы с генетическим материалом родов *Triticum* и *Aegilops* к ржавчинным болезням в Западной Сибири. Опубликован выборочный список «Каталогов мировой коллекции ВИР» по кукурузе за 1961–2023 гг.

Для ресурсоведов, ботаников, генетиков, селекционеров, преподавателей вузов биологического и сельскохозяйственного профиля.

ISSN 2227-8834 (Print)
ISSN 2619-0982 (Online)

© Федеральный исследовательский центр Всероссийский
институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 2025

Editors in charge of this issue: *Elena K. Khlestkina*, Dr. Sci. (Biology), Professor of the RAS, Corr. Member of the RAS, Russia, *Elena A. Sokolova*, Dr. Sci. (Biology), Russia
Editor/Translator: *Anton G. Krylov*, Russia

Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding / N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources. St. Petersburg : VIR, 2025. Vol. 186, iss. 3. 294 p.

The results of studying and *in vitro* preservation of the rare endangered species *Prunus armeniaca* L., as well as nine rare endangered plants of the Rosaceae family, valuable for agriculture, medicine and ornamental horticulture in Kazakhstan, are presented. Enrichment of the VIR herbarium collection with materials from France and its subordinate territories in the 1920–1930s is discussed. The effect of the starting nitrogen dose on the yield of Kabuli chickpeas has been studied under different irrigation regimes. The status and global trends are highlighted for the cultivation of varieties and breeding forms of various *Actinidia* spp. The effect of *in vitro* inoculation of strawberry microplants with rhizobacteria strains on their stress response has been analyzed during *ex vitro* cultivation under hydroponic conditions. Variability of grain color parameters has been ascertained among local maize cultivars in Azerbaijan. An introgression into chromosome 5AL of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) from tetraploid wheat (*Triticum timopheevii* (Zhuk.) Zhuk. subsp. *timopheevii*) has been found to produce a negative effect on drought tolerance and productivity. A flax fiber quality estimation technique using the Instron 5943 universal breaking device is proposed for small samples. Interrelationships among morphological traits and seed yield in garden cress have been revealed under two environmental circumstances in Iran. Hybrids of *Olea europaea* L. developed at the Nikita Botanical Gardens have been evaluated for breeding purposes. The effect of additional UV-A irradiation on some biochemical and morphometric indicators in potato has been studied under greenhouse conditions. The potential of guar accessions from VIR for breeding has been assessed under the conditions of Russia. Bioactive compounds have been analyzed in Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) tubers from the VIR collection. Vavilov's law in the era of next-generation sequencing is discussed (answers, puzzles, and hints). A study of the donors of earliness in maize and their use in breeding has been conducted in the steppe zone of the North Caucasus Federal District of Russia. 'Charyshskaya Krasavitsa', a new fodder cultivar of barnyard millet (*Echinochloa frumentacea* Link) for Western Siberia, is described. *Triticum ispahanicum* Heslot has been scientifically analyzed as a genetic resource for improving *T. aestivum* L. A set of SSR markers chosen by the ECPGR has been employed to systematize the national pear collection of Belarus maintained at the Institute for Fruit Growing. Two hexaploid oat (*Avena sativa* L.) cultivars with high nutritive value of groat for human consumption are characterized as a national-level innovation for Morocco. Resistance of barley accessions from the East Asian Center of crop diversity to the net and spot forms of the net blotch pathogen has been studied. Bread wheat introgression accessions with genetic material from the *Triticum* and *Aegilops* genera have been analyzed for resistance to rust diseases in Western Siberia. A selective list of the 1961–2023 *Catalogues of the VIR Global Collection* on maize is published.

Addressed to genetic resources experts, geneticists, plant breeders, and lecturers of biological and agricultural universities and colleges.

ISSN 2227-8834 (Print)
ISSN 2619-0982 (Online)

© Federal Research Center
the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

МОБИЛИЗАЦИЯ И СОХРАНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Алтаева Н.А., Земцова А.С., Артимович Н.А., Толеген А.Б., Кушнаренко С.В., Ромаданова Н.В.
Изучение и сохранение в культуре *in vitro* редкого исчезающего вида *Prunus armeniaca* L. в Казахстане 9

Багмет Л.В., Хаблова Е.С.
Пополнение гербарной коллекции ВИР из Франции и подконтрольных ей территорий в 20–30-е годы XX века 23

Земцова А.С., Алтаева Н.А., Аралбаева М.М., Артимович Н.А., Толеген А.Б., Кушнаренко С.В., Сатеков Е.Я., Премина Н.В., Ромаданова Н.В.
Изучение и создание коллекций *in vitro* редких исчезающих растений семейства Rosaceae 37

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Аль-Алло Х.Х.Б., Джанмохаммади М., Хейрха М., Сабагния Н.
Влияние начальной дозы азота при различных режимах орошения на урожайность нута сортотипа Кабули 57

Андреев Р.О., Козак Н.В., Цюпка С.Ю., Гончаренко В.А., Горина В.М.
Состояние и мировые тенденции выращивания сортов и селекционных форм различных видов актинидии 68

Куликов А.А., Ткаченко О.В., Евсеева Н.В., Каргаполова К.Ю., Денисова А.Ю., Позднякова Н.Н., Бурыгин Г.Л., Широков А.А.
Влияние инокуляции штаммами ризобактерий микрорастений земляники *in vitro* на их стрессовый ответ при культивировании *ex vitro* в условиях гидропоники 80

Мамедова Х.Р., Хатефов Э.Б., Экинджи Р.
Изменчивость параметров цвета зерна местных сортов кукурузы Азербайджана 92

Осипова С.В., Пермяков А.В., Рудиковский А.В., Пермякова М.Д., Рудиковская Е.Г., Поморцев А.В., Пшеничникова Т.А.
Негативное влияние интрогрессии в хромосому 5AL мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) от тетраплоидной пшеницы (*Triticum timopheevii* (Zhuk.) Zhuk. subsp. *timopheevii*) на устойчивость к засухе и продуктивность 102

Павлов А.В., Брач Н.Б., Пороховинова Е.А., Хлесткина Е.К.
Методика определения качества волокна льна по малым пробам с использованием универсальной разрывной машины Instron 5943 112

Сабагния Н., Рахими В., Мохебодини М., Джанмохаммади М.
Взаимосвязь между морфологическими признаками и урожайностью семян кресс-салата в двух экологических условиях 127

Цюпка С.Ю., Булавин И.В., Таран Н.А., Синченко А.В., Цюпка В.А.
Селекционная оценка гибридов *Olea europaea* L. 140

Щербёнок С.В., Лисина Т.Н., Елисеев С.Л., Каракайтис Д.Ю.
Влияние дополнительного УФ-А-облучения на некоторые биохимические и морфометрические показатели картофеля в условиях защищенного грунта 150

КОЛЛЕКЦИИ МИРОВЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СЕЛЕКЦИИ

Вишнякова М.А., Шаухаров Р.А., Кочерина Н.В., Архимандритова С.Б., Дзюбенко Е.А.
Селекционный потенциал образцов гуара из коллекции ВИР при оценке в условиях Российской Федерации 163

Лебедева Н.В., Любченко А.В., Соловьева А.Е., Варганова И.В., Рогозина Е.В.
Биологически активные вещества в клубнях топинамбура (*Helianthus tuberosus* L.) коллекции ВИР 173

ГЕНЕТИКА КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Хлесткина Е.К.
Закон Вавилова в эпоху секвенирования нового поколения: ответы, загадки, подсказки 187

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ СЕЛЕКЦИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Волощенко Т.В., Уткин А.Д., Хатефов Э.Б.
Использование доноров раннеспелости в селекции кукурузы в условиях степной зоны Северо-Кавказского федерального округа России 199

Чебатарев А.П., Чебатарева М.В., Жаркова С.В., Володин А.Б.
'Чарышская Красавица' – новый сорт пайзы (*Echinochloa frumentacea* Link) кормового направления для Западной Сибири 209

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ПРОБЛЕМ

Дружин А.Е., Сибикеев С.Н., Гультяева Е.И., Фитилева З.Е., Андреева Л.В.
Triticum ispahanicum Heslot – генетический ресурс для улучшения вида *T. aestivum* L. 218

Марцинкевич Т.Н., Якимович О.А., Кондратенок Ю.Г., Кухарчик Н.В., Рымко А.Н.
Систематизация национальной коллекции груши с использованием набора SSR-маркеров, рекомендованного ECPGR 231

Саиди Н., Шайми Н., Тагути М., Бенали А., Манзали Р., Туил С., Дуаик А., Габун Ф., Буксаим М., Аль Фаиз Ш., Ладизинский Г.
Создание двух гексаплоидных сортов овса (*Avena sativa* L.) пищевого назначения с высокой питательной ценностью крупы: национальная инновация Марокко 245

ИММУНИТЕТ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Лашина Н.М., Афанасенко О.С., Лоскутов И.Г.
Устойчивость образцов ячменя из Восточноазиатского центра разнообразия культуры к net- и spot-формам возбудителя сетчатой пятнистости 260

Плотникова Л.Я., Кнауб В. В., Жанболат Т.М., Сколотнева Е.С., Лаприна Ю.В., Зуев Е.В.
Резистентность интрогрессивных образцов мягкой пшеницы с генетическим материалом родов *Triticum* и *Aegilops* к ржавчинным болезням в Западной Сибири 270

Выборочный список «Каталогов мировой коллекции ВИР» по кукурузе за 1961–2023 гг. 285

CONTENTS

MOBILIZATION AND CONSERVATION OF THE GENETIC DIVERSITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Altayeva N.A., Zemtsova A.S., Artimovich N.A., Tolegen A.B., Kushnarenko S.V., Romadanova N.V.
Study and *in vitro* preservation of the rare endangered species *Prunus armeniaca* L. in Kazakhstan 9

Bagmet L.V., Khablova E.S.
Enrichment of the VIR herbarium collection with materials from France and its subordinate territories in the 1920–1930s 23

Zemtsova A.S., Altayeva N.A., Aralbaeva M.M., Artimovich N.A., Tolegen A.B., Kushnarenko S.V., Satekov Ye.Ya., Premina N.V., Romadanova N.V.
Studying and setting up *in vitro* collections of rare endangered plants of the Rosaceae family 37

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Al-Allo H.H.B., Janmohammadi M., Kheyrkhah M., Sabaghnia N.
The effect of the starting nitrogen dose under different irrigation regimes on the yield of Kabuli chickpeas 57

Andreev R.O., Kozak N.V., Tsiupka S.Yu., Goncharenko V.A., Gorina V.M.
Status and global trends in the cultivation of varieties and breeding forms of various *Actinidia* spp. 68

Kulikov A.A., Tkachenko O.V., Evseeva N.V., Kargapolova K.Yu., Denisova A.Yu., Pozdnyakova N.N., Burygin G.L., Shirokov A.A.
The effect of *in vitro* inoculation of strawberry microplants with rhizobacteria strains on their stress response during *ex vitro* cultivation under hydroponic conditions 80

Mammadova H.R., Khatefov E.B., Ekinci R.
Variability of grain color parameters among local maize cultivars in Azerbaijan 92

Osipova S.V., Permyakov A.V., Rudikovskii A.V., Permyakova M.D., Rudikovskaya E.G., Pomortsev A.V., Pshenichnikova T.A.
Negative effect of an introgression into chromosome 5AL of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) from tetraploid wheat (*Triticum timopheevii* (Zhuk.) Zhuk. subsp. *timopheevii*) on drought tolerance and productivity 102

Pavlov A.V., Brutch N.B., Porokhovinova E.A., Khlestkina E.K.
Flax fiber quality estimation technique for small samples using the Instron 5943 universal breaking device 112

Sabaghnia N., Rahimi V., Mohebodini M., Janmohammadi M.
Interrelationships among morphological traits and seed yield in garden cress under two environmental circumstances 127

Tsiupka S.Yu., Bulavin I.V., Taran N.A., Sinchenko A.V., Tsiupka V.A.
Evaluation of *Olea europaea* L. hybrids for breeding 140

Shcherbyonok S.V., Lisina T.N., Eliseev S.L., Karakajtis D.J.
The effect of additional UV-A irradiation on some biochemical and morphometric indicators in potato under greenhouse conditions 150

COLLECTIONS OF THE WORLD'S CROP GENETIC RESOURCES FOR THE DEVELOPMENT OF PRIORITY PLANT BREEDING TRENDS

Vishnyakova M.A., Shaukharov R.A., Kocherina N.V., Arkhimandritova S.B., Dzyubenko E.A.
Breeding potential of guar accessions from the VIR collection evaluated under the conditions of the Russian Federation 163

Lebedeva N.V., Lyubchenko A.V., Solovyeva A.E., Varganova I.V., Rogozina E.V.
Bioactive compounds in Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) tubers from the VIR collection 173

GENETICS OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Khlestkina E.K.
Vavilov's law in the era of next-generation sequencing: answers, puzzles, hints 187

DOMESTIC PLANT BREEDING AT THE PRESENT STAGE

Voloshchenko T.V., Utkin A.D., Khatefov E.B.
Using donors of earliness in maize breeding in the steppe zone of the North Caucasus Federal District of Russia 199

Chebatarev A.P., Chebatareva M.V., Zharkova S.V., Volodin A.B.
'Charyshskaya Krasavitsa' is a new fodder cultivar of barnyard millet (*Echinochloa frumentacea* Link) for Western Siberia 209

IDENTIFICATION OF THE DIVERSITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES FOR SOLVING FUNDAMENTAL AND APPLIED PROBLEMS

Druzhin A.E., Sibikeev S.N., Gultyaeva E.I., Fitileva Z.E., Andreeva L.V..
Triticum ispahanicum Heslot: a genetic resource for improving the species *T. aestivum* L. 218

Martsynkevich T.M., Yakimovich V.A., Kandratsenak Yu.G., Kukharchyk N.V., Rymko A.M.
Using a set of SSR markers chosen by the ECPGR to systematize the national pear collection 231

Saidi N., Shaimi N., Taghouti M., Benali A., Manzali R., Touil S., Douaik A., Gaboun F., Bouksaim M., Al Faiz C., Ladizinsky G.
Release of two hexaploid oat (*Avena sativa* L.) cultivars with high nutritive value of groat for human consumption: an innovation at the Moroccan national level 245

IMMUNITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Lashina N.M., Afanasenko O.S., Loskutov I.G.
Resistance of barley accessions from the East Asian Center of crop diversity to the net and spot form of the net blotch pathogen 260

Plotnikova L.Ya., Knaub V.V., Zhanbolat T.M., Skolotneva E.S., Laprina Yu.V., Zuev E.V.
Resistance of bread wheat introgression accessions with genetic material from the *Triticum* and *Aegilops* genera to rust diseases in Western Siberia 270

Selective list of the Catalogues of the VIR Global Collection on maize published in 1961–2023 285

МОБИЛИЗАЦИЯ И СОХРАНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 581.1:581.9:502.05:582.734.6:581.4:581.481
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-9-22

CC BY

Изучение и сохранение в культуре *in vitro* редкого исчезающего вида *Prunus armeniaca* L. в Казахстане

Н. А. Алтаева[1], А. С. Земцова[1], Н. А. Артимович[1], А. Б. Толеген[1, 2], С. В. Кушнаренко[1], Н. В. Ромаданова[1]

[1] *Институт биологии и биотехнологии растений, Алматы, Казахстан*

[2] *Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

Автор, ответственный за переписку: Назира Алтайқызы Алтаева, altnazira@gmail.com

Актуальность. Гибель растений в природных популяциях приводит к утрате биоразнообразия и изменениям экосистем. Комплексное изучение и восстановление деградирующих популяций, особенно редких видов, актуально. Биотехнология культуры тканей – важный инструмент сохранения генетического разнообразия.
Материалы и методы. Собраны и изучены 115 образцов *Prunus armeniaca* L. из двух популяций Алматинской области. Применялись геоботанические методы и методы культуры тканей.
Результаты. Проведена дескрипторная оценка (46 признаков), собраны гербарии, выполнено дистанционное зондирование, построены цифровая модель рельефа (ЦМР) и ортофотоплан, рассчитан NDVI (0,3–0,7). При введении в культуру *in vitro* зародышевых осей оптимальной для размножения была среда Кнопа (94,5% жизнеспособности). На среде 523 выявлен низкий уровень контаминации (1,1%). Максимальный коэффициент размножения (КР) (2,9) достигнут на среде МС5 с 1 мг/л 6-бензиламинопурина (БАП) и 0,3 мг/л гиббереллловой кислоты (ГК).
Заключение. Установлено реальное состояние популяций: высокая поражаемость (до 52,6%) и отсутствие плодоношения в отдельных точках. Составлены картосхемы территории. Подтверждена эффективность среды Кнопа для проращивания зародышевых осей в культуре *in vitro*, тестирование побегов *in vitro* на среде 523 выявило низкий процент контаминации (1,1%). Максимальный КР (2,9) получен на среде МС5 с повышенным содержанием БАП и ГК.

Ключевые слова: *Prunus armeniaca*, картирование, NDVI, популяции, размножение *in vitro*

Благодарности: работа выполнена в рамках программы BR21882024, проект 0123РК01118 «Изучение биоразнообразия редкого исчезающего вида *Prunus armeniaca* L. и *ex situ* сохранение генотипов с ценными хозяйственно-биологическими признаками».
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Алтаева Н.А., Земцова А.С., Артимович Н.А., Толеген А.Б., Кушнаренко С.В., Ромаданова Н.В. Изучение и сохранение в культуре *in vitro* редкого исчезающего вида *Prunus armeniaca* L. в Казахстане. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(3):9-22. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-9-22

© Алтаева Н.А., Земцова А.С., Артимович Н.А., Толеген А.Б., Кушнаренко С.В., Ромаданова Н.В., 2025

IMMUNITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-9-22

Study and *in vitro* preservation of the rare endangered species *Prunus armeniaca* L. in Kazakhstan

Nazira A. Altayeva[1], Alina S. Zemtsova[1], Natalya A. Artimovich[1], Arman B. Tolegen[1, 2], Svetlana V. Kushnarenko[1], Natalya V. Romadanova[1]

[1] *Institute of Plant Biology and Biotechnology, Almaty, Kazakhstan*

[2] *Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

Corresponding author: Nazira A. Altayeva, altnazira@gmail.com

Background. The decline of plants in natural populations leads to biodiversity loss and ecosystem disruption. Comprehensive study and restoration of degrading populations, particularly of rare species, is highly relevant. Plant tissue culture biotechnology is an important tool for conserving genetic diversity.
Materials and methods. A total of 115 accessions of *Prunus armeniaca* L. from two populations in Almaty Region were collected and studied employing geobotanical and tissue culture techniques.
Results. Descriptor-based evaluation (46 parameters) was conducted, herbarium specimens were prepared, remote sensing was performed, a digital elevation model (DEM) and orthophotomap were created, and NDVI values (0.3–0.7) were calculated. For *in vitro* initiation of embryonic axes, Knop's medium proved optimal, with 94.5% viability. Medium 523 showed a low contamination rate (1.1%). The highest multiplication rate (MR) of 2.9 was achieved on the MS5 medium supplemented with 1 mg L^{-1} of 6-benzylaminopurine (BAP) and 0.3 mg L^{-1} of gibberellic acid (GA).
Conclusion. The actual condition of the populations was determined: high incidence of damage (up to 52.6%) and absence of fruiting in certain areas. Cartographic maps of the territory were made. The effectiveness of Knop's medium for *in vitro* germination of embryonic axes was confirmed, and testing of *in vitro* shoots on medium 523 showed a low contamination level (1.1%). The highest MR (2.9) was obtained on the MS5 medium with elevated concentrations of BAP and GA.

Keywords: *Prunus armeniaca*, mapping, NDVI, populations, *in vitro* propagation

Acknowledgements: the work was carried out within the framework of the BR21882024 program, Project 0123РК01118 "Study of biodiversity of the rare endangered species *Prunus armeniaca* L. and *ex situ* conservation of genotypes with valuable economic and biological traits".
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Altayeva N.A., Zemtsova A.S., Artimovich N.A., Tolegen A.B., Kushnarenko S.V., Romadanova N.V. Study and *in vitro* preservation of the rare endangered species *Prunus armeniaca* L. in Kazakhstan. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(3):9-22. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-9-22

Введение

Абрикос обыкновенный (*Prunus armeniaca* L.) – единственный вид абрикоса, произрастающий на территории Казахстана. Под влиянием антропогенной деятельности и природно-климатических изменений этот вид стал редким, с резко сокращающимся ареалом, и внесен в Красную книгу Казахстана (Red Data Book…, 2014). Дикорастущий абрикос Заилийского и Джунгарского Алатау отличается повышенной зимостойкостью (выдерживает морозы до –30°C), исключительным полиморфизмом и устойчивостью к болезням (Zaurov et al., 2013). Он также обладает высокой хозяйственной ценностью, является важным источником генофонда (Zaurov et al., 2013; Jiang et al., 2019; Groppi et al., 2021). Плоды дикорастущего абрикоса Казахстана по содержанию сахаров (7,6–11,5%) не уступают культурным сортам европейской группы, содержат схожее количество клетчатки (0,96%), но превосходят их по концентрации органических кислот (2,35%) и пектиновых веществ (1,85%) (Mukanova et al., 2024).

Гибель растений в природных популяциях ведет к их исчезновению и глобальным изменениям экосистем. Казахстанские ботаники изучали популяции абрикоса, в результате были выявлены места произрастания и состояние дикорастущих популяций, сделаны выводы о массовом исчезновении этого уникального вида (Dzhangaliev et al., 2001, 2003; Kokoreva et al., 2013). Поэтому изучение, сохранение и восстановление деградирующих популяций имеют первостепенное значение. Геоботанические комплексные исследования растений включают в себя изучение как самих растений, так и среды их обитания (Rotach, 2003; Lateur et al., 2022; https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL). Дистанционное зондирование, создание геодезических и географических карт мест произрастания абрикоса может быть использовано для контроля использования территории и сохранения экосистемы (Balenović et al., 2015a, b).

Для сохранения генетического материала исчезающих растений, помимо традиционных методов – создания заказников, заповедников, национальных парков, а также культивирования в ботанических садах, – необходимо активно внедрять современные биотехнологические подходы, такие как сохранение *ex situ* в культуре тканей (Romadanova, Kushnarenko, 2023). В последние годы методы биотехнологии *in vitro* находят все более широкое применение для сохранения и размножения ценных дикорастущих видов (Trigiano, Gray, 2011; Romadanova et al., 2016; Alzubi et al., 2019; Kushnarenko et al., 2020; Abdalla et al., 2022). Ученые по всему миру формируют коллекции *in vitro* и осуществляют долгосрочную криоконсервацию генетического материала в специализированных банках (Gavrilenko et al., 2007; Engelmann, 2011; Dunaeva et al., 2012; Chaudhury, Malik, 2017; Jenderek, Reed, 2017; Romadanova et al., 2017; Coelho et al., 2020; Kushnarenko et al., 2023). Эти инновационные методы позволяют сохранять растительную гермоплазму без временных ограничений, клонировать растения в тканевых культурах, очищать их от эндофитных и вирусных инфекций, а также получать саженцы для реинтродукции в естественные экосистемы или использования в сельском хозяйстве (Engelmann, 2011; Romadanova et al., 2024). Биотехнология культуры тканей играет ключевую роль в сохранении генетического биоразнообразия, особенно для редких и исчезающих видов, включая абрикос. Однако исследований по микроклональному размножению и криоконсервации апикальных меристем абрикоса крайне мало, что свидетельствует о недостаточной изученности данного направления (Soliman, 2012; Lalso et al., 2018; Balla, Vertesy, 2000; Šiško et al., 2022). В Казахстане была начата работа по оптимизации питательной среды для микроклонального размножения абрикоса и криоконсервации зародышевых осей (Kovalchuk et al., 2014, 2017). Однако данные исследования требовали детальной доработки. Поэтому *целью данной работы* стало изучение природных популяций *P. armeniaca* и оптимизация этапов введения в культуру *in vitro* и микроклонального размножения для создания коллекции *in vitro*.

Материалы и методы исследования

Объекты исследования – 115 образцов *P. armeniaca*, собранные в двух популяциях в Алматинской области (бывшая Алма-Атинская): ущелье Тургень Енбекшиказахского района (25 образцов); ущелье Большой Аксу Уйгурского района (44 образца, 1-я точка), ущелье Большой Кыргызсай Уйгурского района (25 образцов, 2-я точка), предгорье ущелья Большой Кыргызсай (16 образцов, 3-я точка) и с. Чунджа, лесное хозяйство «Карадала» (5 образцов, 4-я точка) (рис. 1, табл. 1).

Таблица 1. Места сбора, GPS-координаты и высота произрастания *Prunus armeniaca* L.
Table 1. Collection locations, GPS coordinates and growing altitude of *Prunus armeniaca* L.

Место сбора, год	Количество образцов	GPS-координаты, высота над уровнем моря, м
Ущелье Тургень Енбекшиказахского района, 2023–2024 гг.	23 образца	N43°22’.417’ – N43°22’.832’, E077°35’.351’ – E077°35’.868’, 980–1046 м
Ущелье Большой Аксу Уйгурского района, 2023–2024 гг.	42 образца	N43°17’.118’ – N43°18’.456’, E079°37’.901’ – E079°39’.901’, 1302–1691 м
Ущелье Большой Кыргызсай Уйгурского Района, 2023–2024 гг.	23 образца	N43°18’.072’ – N43°18’.702’, E079°30’.658’ – E079°32’.314’, 1580–1692 м
Предгорье ущелья Большой Кыргызсай Уйгурского района, 2023–2024 гг.	16 образцов	N43°20’.784’ – N43°20’.875’, E079°29’.827’ – E079°29’.890’, 1234–1246 м
С. Чунджа, лесное хозяйства «Карадала», 2024 г.	5 образцов	N43°31’.652’ – N43°31’.674’, E079°27’.353’ – E079°27’.849’, 862–864 м

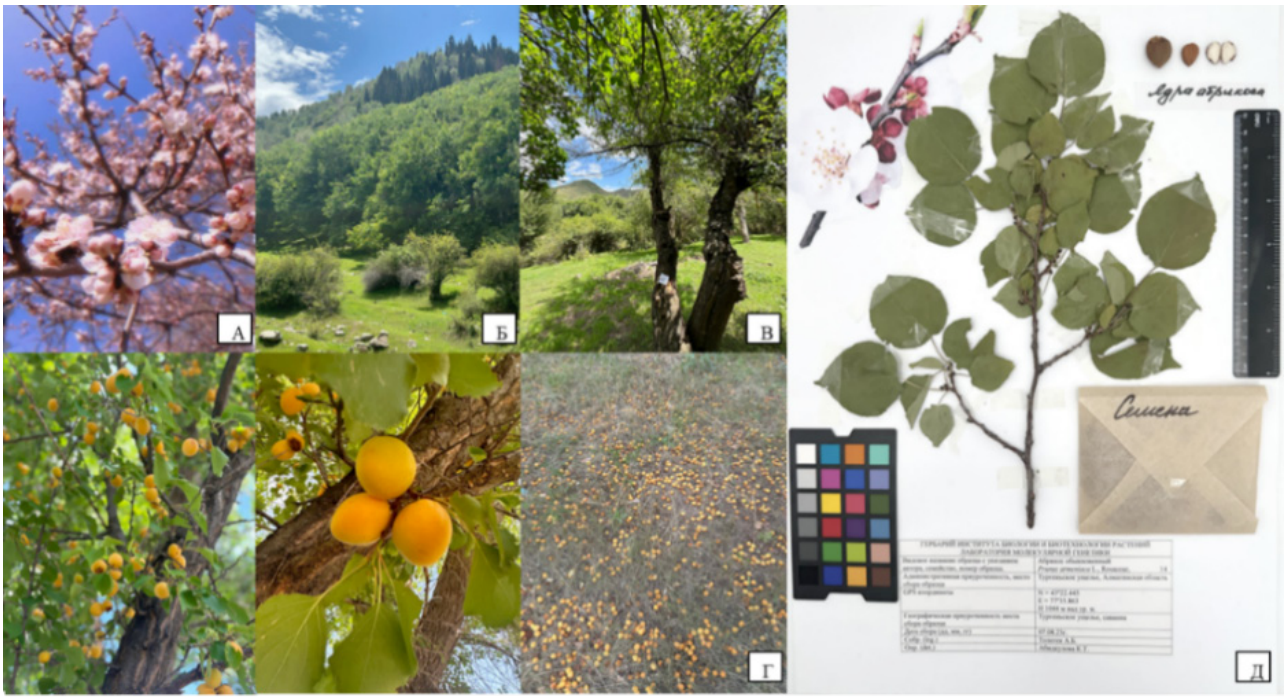


Рис. 1. ***Prunus armeniaca*** **L.: А** – цветение абрикоса в ущелье Тургень Енбекшиказахского района; **Б** – лесной массив в ущелье Большой Аксу Уйгурского района; **В** – взрослое жизнеспособное неплодоносящее дерево в ущелье Большой Кыргызсай Уйгурского района; **Г** – взрослое жизнеспособное плодоносящее дерево и опавшие плоды в предгорье ущелья Большой Кыргызсай Уйгурского района; **Д** – гербарий образца № 25

Fig. 1. ***Prunus armeniaca*** **L.: А** – apricot flowering in the Turgen Gorge, Enbekshikazakh District; **Б** – a forest massif in the Bolshoy Aksu Gorge, Uyghur District; **В** – an adult viable non-fruit-bearing tree in the Bolshoy Kyrgyzsay Gorge, Uyghur District; **Г** – an adult viable fruit-bearing tree and fallen fruits in the foothills of the Bolshoy Kyrgyzsay Gorge, Uyghur District; **Д** – herbarium of accession No. 25

Ботаническое описание

Для оценки состояния растительных популяций *P. armeniaca* изучили и проанализировали имеющиеся карты произрастания растений и выбрали маршруты экспедиций. Для описания состояния популяций *P. armeniaca* использовались дескрипторы, разработанные Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO), Международным институтом генетических ресурсов растений (International Plant Genetic Resources Institute, IPGRI), Европейской кооперативной программой по генетическим ресурсам растений (European Cooperative Programme for Plant Genetic Resources, ECPGR) (Rotach, 2003; Lateur et al., 2022).

Описание в дескрипторах осуществлялось с учетом 46 параметров. В природных условиях координаты участков произрастания фиксировали с помощью GPS-навигатора eTREX®H Garmin Montana 750i. Все деревья помечали специальной биркой с номером образца и датой сбора.

Дистанционное зондирование территорий для картирования естественных посадок дикого абрикоса

Проводили определение территории для съемки, разметку изучаемой площади по контурам территории, подготовку беспилотных летательных аппаратов (1. DJI Mavic 3E с RGB-камерой; 2. DJI Phantom 4 с мультиспектральной камерой) для съемки – внесение полетного задания. Карты рельефа создавали в формате Geotiff, 3D-модели местности – в формате OBJ, проект – в платформе QGIS, с отмеченными точками дикорастущего абрикоса, исходные данные с камер БПЛА представлены в виде фотографий.

Для проведения биотехнологических работ проводили:

1) сбор плодов (плоды каждого образца помещали в пластиковые контейнеры объемом 250 мл или полиэтиленовые пакеты);

2) сбор побегов (побеги размером 15–30 см срезали секатором и помещали между картонными листами размером 42 × 59,4 см для гербаризации).

Фотосъемку проводили в фотобоксе Godox LSD60 с LED-подсветкой на фотокамеру Canon EOS RP RF 24-105 F4-7.1 IS STM. Фотоснимки с трехкратным увеличением сделаны на стереоскопическом микроскопе Levenhuk ZOOM 0750 с цифровой камерой Levenhuk M200.

Введение в культуру in vitro изолированных зародышевых осей

Семена очищали от мякоти плодов, промывали проточной водой и высушивали в лабораторных условиях (ЛУ) (рис. 2, А), помещали в пластиковые контейнеры объемом 500 мл и стратифицировали при 4°С в течение 8 недель при освещенности 10 $\mu E \cdot m^{-2} s^{-1}$, 16-часовом фотопериоде. После стратификации семена очищали от оболочки (скорлупы) с помощью орехокола (рис. 2, Б), ядра обрабатывали ¼ раствора отбеливателя «Белизна» (5–15% гипохлорита натрия, щелочные компоненты ≤ 5%) в течение 4 мин с последующим промыванием в проточной воде. Ядра в стерильных условиях ламинарного бокса (Haier Biological Safety Cabinet, HR 1200-II A2-D, Китай) обрабатывали в 0,1-процентном растворе $HgCl_2$ (Sigma-Aldrich, Сент-Луис, Миссури, США) в течение 3 мин с последующим трехкратным промыванием в стерильной дистиллированной воде.

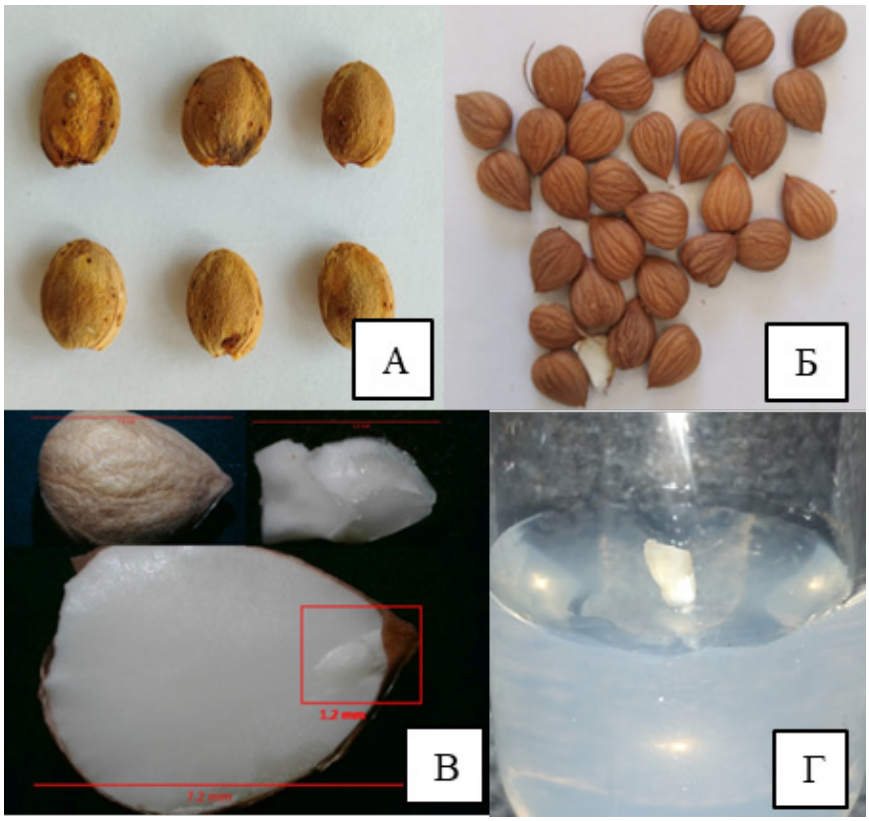


Рис. 2. Введение в культуру *in vitro Prunus armeniaca* L.: А – высушенные семена; **Б** – ядра, очищенные от скорлупы; **В** – семена и изолированные зародышевые оси (увеличение 3×); **Г** – зародышевая ось на питательной среде Кнопа

Fig. 2. *In vitro* initiation of *Prunus armeniaca* L.: А – dried seeds; **Б** – kernels peeled from shell; **В** – seeds and isolated embryonic axes (3× magnification); **Г** – an embryonic axis on Knop's medium

Из ядер изолировали зародышевые оси (рис. 2, В), помещали в культуральные пробирки (150 × 25 мм) (PhytoTechnology Laboratories®, Ленекса, Канзас, США) на следующие варианты питательных сред (рис. 2, Г): 1) Кнопа (Knop, 1865) и 2) Мурасиге – Скуга (МС) с 30 г/л сахарозы, 1 мг/л 6-бензиламинопурина (БАП), 0,1 мг/л индолилмасляной кислоты (ИМК), 2 мг/л пантотената кальция (ПК), 1,75 г/л джелрайта, 4 г/л агара, pH = 5,7 (PhytoTechnology Laboratories®, Ленекса, Канзас, США) (Murashige, Skoog, 1962). Побеги *in vitro* выращивали при температуре 24 ± 1°C в течение 16-часового светового дня с интенсивностью света 40 $\mu E \cdot m^{-2} s^{-1}$ от двух типов трубчатых люминесцентных ламп OPPLE: YK 21RR 16/G 21W 6500K RGB и YK 21RL 16/G 21W 4000K RGB, поставляемых ElectroComplex in Corporation (Алматы, Казахстан) – стандартные условия (СУ).

Проверка растений на эндофитную микрофлору

Побеги в культуре *in vitro* протестировали на присутствие эндофитной контаминации на специализированной среде 523: 10 г/л сахарозы, 8 г/л гидролизата казеина (Sigma-Aldrich, Сент-Луис, Миссури, США), 4 г/л дрожжевого экстракта, 2 г/л KH_2PO_4, 0,15 г/л $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, 6 г/л джелрайта, pH 6,9 (Viss et al., 1991). У 4-недельных побегов *in vitro* изолировали основания длиной 3–5 мм и помещали в пластиковые чашки Петри (100 × 15 мм) (PhytoTechnology Laboratories®, Ленекса, Канзас, США) на среду 523, культивировали в ЛУ в течение 1–2 недель (Romadanova et al., 2022).

Микроклональное размножение

Для оптимизации состава питательной среды использовали 10 вариантов питательных сред на основе среды МС с добавлением 30 г/л сахарозы, 2 мг/л ПК, 1,75 г/л джелрайта, 4 г/л агара, pH 5,7 с различными концентрациями регуляторов роста (табл. 2).

Оптимизацию проводили для побегов (1–2 см) 10 образцов абрикоса в стеклянных культуральных сосудах объемом 237 мл (PhytoTechnology Laboratories®, Ленекса, Канзас, США), плотность посадки – 5 побегов на сосуд. Побеги культивировали в СУ, пересадку на свежую питательную среду осуществляли с интервалом 6 недель. Коэффициент размножения (КР) *in vitro* побегов абрикоса рассчитывали по формуле: P = a/вс, где «а» – количество образовавшихся побегов, «в» – количество высаженных побегов, «с» – количество культивирований.

Статистический анализ

В экспериментах по введению в культуру *in vitro* использовали по 10 побегов абрикоса в трехкратной повторности. Общее количество побегов, индексированных с использованием специализированной питательной среды 523, колебалось от 15 до 30, в зависимости от доступности образцов, полученных после введения в культуру *in vitro*. Эксперимент по микроклональному размножению проводили дважды для 10–45 побегов в каждом варианте. Средние значения и стандартную ошибку (SE) вычисляли на основе повторных экспериментов и подвергали тщательной проверке посредством дисперсионного анализа. Для выделения различий между средними значениями применяли тест Тьюки; при $P \leq 0,05$ результаты считались статистически значимыми. Все исследования осуществлялись с использованием программного пакета SYSTAT версии 13.0 (https://systat.informer.com/13.0; Romadanova et al., 2022).

Таблица 2. Состав питательной среды для размножения *Prunus armeniaca* L. в культуре *in vitro*
Table 2. Nutrient conditions for *in vitro* propagation of *Prunus armeniaca* L.

Культуральная среда	БАП	ИМК	ГК
	мг/л		
1	0,5	0,1	–
2	1,0	0,1	0,1
3	0,5	0,1	0,1
4	1,0	0,1	0,2
5	1,0	0,1	0,3
6	1,0	0,1	0,4
7	0,8	0,1	0,3
8	0,8	0,05	0,3
9	1,0	0,05	0,3
10	0,8	0,02	0,3

Примечание: БАП – 6-бензиламинопурин; ИМК – индолилмасляная кислота; ГК – гиббереллловая кислота; все химикаты были предоставлены СПФ «Мединленд» (Алматы, Казахстан)

Note: БАП – 6-benzylaminopurine, BAP; ИМК – indolebutyric acid, IBA; ГК – gibberellic acid, GA; all chemicals were provided by SPF Mediland (Almaty, Kazakhstan)

Результаты исследования

Описание популяций

Впервые проведено описание популяций абрикоса с использованием международных дескрипторов. Выявлено, что поражаемость деревьев вредителями и болезнями первой популяции *P. armeniaca* составила 35,5%, наблюдались сухие ветви на старых деревьях, что может быть следствием естественного старения (табл. 3).

Доминантные виды растений в месте сбора: *Berberis heteropoda* Schrenk, *Crataegus dsungarica* Zabel ex Lange, *Elaeagnus angustifolia* L., *Rosa platyacantha* Schrenk, *Spiraea hypericifolia* L. и другие. Плодоношение отсутствовало.

Доминантные виды растений в месте сбора второй популяции (первая точка) представлены следующими видами: *Berberis heteropoda*, *Cotoneaster melanocarpus* Fisch. ex Blytt, *Lonicera xylosteum* L., *Picea schrenkiana* Fisch. & C.A. Mey и другие. Поражаемость деревьев – 52,6% (сухие ветви, повреждение листьев и плодов насекомыми, грибные заболевания).

Вторая популяция (вторая точка). Доминантные виды растений в месте сбора: *Berberis heteropoda*, *Malus sieversii* (Ledeb.) M. Roem., *Lonicera xylosteum*, *Picea schrenkiana*, *Filipendula ulmaria* (L.) Maxim. Выявлены повреждения тлей, лишайники. Молодые деревья без повреждений.

Вторая популяция (третья точка). Доминантные виды растений в месте сбора: *Berberis heteropoda*, *Malus sieversii*, *Ulmus pumila* L. и другие. Поражаемость деревьев – 10,0%. Вредители и болезни не обнаружены. Плодоношение обильное.

Вторая популяция (четвертая точка). Доминантные виды растений в месте сбора: *Artemisia santolinifolia* (Turcz. ex Pamp.) Krasch., *Glycyrrhiza uralensis* Fisch., *Malus sieversii*, *Melica transsilvanica* Schur., *Rosa platyacantha* и другие. Деревья не поражены. Вредители и болезни не обнаружены. Взрослые и молодые деревья без повреждений (см. табл. 3). Плодоношение обильное.

Дистанционное зондирование территорий для картирования природных популяций Prunus armeniaca

Впервые проведено дистанционное зондирование территорий произрастания абрикоса, в результате которого определена его массовая локация, размечена изучаемая площадь. В результате получены снимки, которые были обработаны для создания наборов карт (рис. 3).

В результате дистанционного зондирования создан ортофотоплан (фотодокумент местности) с помощью перекрывающихся исходных снимков (см. рис. 3, А), который послужит вспомогательным материалом для создания геодезических графических чертежей (схем, топопланов, карт) мест произрастания абрикоса, может быть задействован для контроля использования территории, в экологии, мониторинге экзогенных процессов и сельском хозяйстве. Кроме того, получена цифровая модель рельефа (ЦМР) – трехмерное отображение земной поверхности (рельефа), представленная в виде массива точек с определяемой высотой, без учета растительности, зданий и других антропогенных объектов (см. рис. 3, Б).

Полученная ЦМР может быть использована в географических информационных системах (ГИС), так как является наиболее распространенной основой для цифровых карт рельефа. Кроме того, ЦМР может быть полезна для моделирования ландшафта, визуализация приложений ЦМР часто требуется для моделирования наводнений или дренажа, исследований землепользования и геологических приложений (Balenović et al., 2015a).

Установлен NDVI – числовой показатель качества и количества растительности на участке поверхности, зависящий от отражения и поглощения растениями световых волн разной длины (см. рис. 3, В) (Weier, Herring, 2000; https://gisgeography.com/ndvi-normalized-difference-vegetation-index). Его практическое применение невероятно разнообразно, включает и количественную оценку лесного фонда, и использование в качестве индикатора засухи. Более того, с его помощью можно

Таблица 3. **Распределение качественных морфологических признаков *Prunus armeniaca* L.**
Table 3. **Distribution of qualitative morphological features of *Prunus armeniaca* L.**

Дескрипторы	Количество образцов	Количество образцов / проценты				
***P. armeniaca* (1-я популяция)**						
ПП	23	Н (11/47,8)	С 5/21,7)			
СД	23	СД (1/4,3)	ВЖ 12/52,3)	МП (2/8,7)	МН (4/17,4)	
ВД	23	Н (3/13,0)	С (5/21,7)	В (15/65,2)		
ФК	23	УП (1/4,3)	ОП (8/34,8)	О (6/26,1)	ПО (1/4,3)	НК (7/30,4)
ПК	23	Г (6/26,1)	С (14/60,9)	Р (3/13,0)		
ФЛП	16	О (15/92,9)	Я (2/12,5)	ШЯ (15/92,9)		
КЛП	16	КГ (1/6,3)	МГ 15/93,8)	КП (1/6,3)		
***P. armeniaca* (2-я популяция, первая точка)**						
ПП	42	С (8/19,1)	В (34/81,0)			
СД	42	ВЖ (30/71,4)	МП (8/19,0)	МН (7/16,7)		
ВД	42	Н (4/9,5)	С (19/45,2)	В (19/45,2)		
ФК	42	УП (3/7,1)	ОП 18/42,9)	ШП (12/28,6)	ШР (1/2,4)	НК (8/19,1)
ПК	42	Г (21/50,0)	С (17/40,5)	Р (4/9,5)		
П	27	НП (22/81,5)	СлП (2/7,4)	СП (1/3,7)	ОП (2/7,4)	
ФЛП	42	О (11/26,2)	Я (21/50,0)	ШЯ (23/54,8)	У (1/2,4)	
КЛП	42	КГ (7/16,7)	МГ 21/50,0)	КП (7/16,7)	МкП (9/21,4)	ПГ (3/7,1)
***P. armeniaca* (2-я популяция, вторая точка)**						
ПП	23	Н (2/8,7)	С (15/65,2)	В (6/26,1)		
СД	23	ВБ (10/43,5)	ВЖ (9/39,1)	МП (3/13,0)	П (1/4,3)	
ВД	23	С (10/43,5)	В (13/56,5)			
ФК	23	УП (1/4,3)	ОП 11/47,8)	ШП (7/30,4)	О (2/8,7)	НК (2/8,7)
ПК	23	Г (15/65,2)	С (8/34,8)			
П	1	НП (22/81,5)	СлП 7/30,4)	СП (5/21,7)		
ФЛП	23	О (2/8,7)	Я (11/47,8)	ШЯ (11/47,8)		
КЛП	23	КГ (5/21,7)	МГ 11/47,8)	КП (3/13,0)	МкП (6/26,1)	
***P. armeniaca* (2-я популяция, третья точка)**						
ПП	16	В (16/100,0)				
СД	16	ВЖ (7/46,7)	МП (9/53,3)			
ВД	16	С (15/93,8)	В (1/6,7)			
ФК	16	ШП 11/68,8%)	О (1/6,7)	НК (3/18,8)		
ПК	16	Г (9/53,3)	С (6/40,0)	Р (1/6,7)		
П	16	СлП (1/6,7)	СП (4/26,6)	ОП (11/66,7)		
ФЛП	16	О (6/40,0)	ШЯ 10/60,0)			
КЛП	16	МГ (16/100,0)				

Таблица 3. **Окончание**
Table 3. **The end**

Дескрипторы	Количество образцов	Количество образцов / проценты				
P. armeniaca **(2-я популяция, четвертая точка)**						
ПП	5	С (5/100,0)				
СД	5	ВЖ (3/60,0)	МП (2/40,0)			
ВД	5	С (5/100)				
ФК	5	О (1/20,0)	НК (4/80,0)			
ПК	5	Г (2/40,0)	С (3/60,0)			
П	5	СП (3/60,0)	ОП (2/40,0)			

Примечание: используемые дескрипторы – высота дерева (ВД), край листовой пластинки (КЛП), плодоношение (П), плотность кроны (ПК), плотность популяции (ПП), состояние дерева (СД), форма кроны (ФК), форма листовой пластинки (ФЛП); анализируемые морфологические признаки – взрослое больное (ВБ), взрослое жизнеспособное (ВЖ), высокий (-ая, -ое) (В), густая (Г), крупногородчатый (КГ), крупнопильчатый (КП), мелкогородчатый (МГ), молодое неплодоносящее (МН), мелкопильчатый (МкП), молодое плодоносящее (МП), неправильная крона (НК), нет плодоношения (НП), низкая (-ое) (Н), обильное плодоношение (ОП), обратнопирамидальная (ОП), округлая (-ое) (О), пильчатогородчатый (ПГ), плоскоокруглая (ПО), погибающее (П), редкая (Р), слабое плодоношение (СлП), средний (-яя, -ее, -ие) (С), среднее плодоношение (СП), старое дряхлое (СД), удлиненная (У), узкопирамидальная (УП), широкопирамидальная (ШП), широкораскидистая (ШР), широкояйцевидная (ШЯ), эллиптическая (Э), яйцевидная (-ое) (Я)

Note: the list of descriptors includes the tree height (ВД), leaf blade edge (КЛП), fruiting (П), crown density (ПК), population density (ПП), tree condition (СД), crown shape (ФК), and leaf blade shape (ФЛП); the symbols for the analyzed morphological characters are adult diseased tree (ВБ), adult viable tree (ВЖ), tall tree (В), dense crown (Г), largely crenate leaf edge (КГ), largely serrate leaf edge (КП), finely crenate leaf edge (МГ), young non-fruitful tree (МН), finely serrate leaf edge (МкП), young fruitful tree (МП), irregular crown (НК), no fruiting (НП), low tree (Н), abundant fruiting (ОП), reverse pyramidal crown shape (ОП), round crown shape (О), serrate-crenate leaf edge (ПГ), flat round crown shape (ПО), dying tree (П), sparse crown (Р), weak fruiting (СлП), medium tree (С), medium fruiting (СП), old decrepit tree (СД), elongated leaf blade shape (У), narrow pyramidal crown (УП), broad pyramidal crown (ШП), broadly spreading crown (ШР), broad ovate leaf blade (ШЯ), elliptical leaf blade (Э), and ovate leaf blade (Я)

определять пожароопасные зоны и составлять карты опустынивания.

Определяя состояние здоровья растений, вычисляли отношение между разностью интенсивностей отраженного света в красном (RED) и инфракрасном диапазоне (NIR) и их суммой. В результате выявлено, что NDVI колебался в значениях от 0,3 до 0,7, что соответствует верхним показателям для слабой, больной растительности, нижним показателям индексов для здоровой растительности; основная масса лесного массива соответствовала средним показателям. Составлена карта размещения оцифрованного участка на территории ущелья Большой Аксу Уйгурского района Алматинской области и карта произрастания абрикоса. Абрикос на карте отмечен красными точками (рис. 3, Г–Д).

Введение в культуру in vitro изолированных зародышевых осей

Для введения в культуру *in vitro* используются различные части и органы растений (Ostrikova et al., 2018; İpek et al., 2023). В данном исследовании использовались зародышевые оси вследствие того, что они являются оптимальным материалом для эффективного введения абрикоса в культуру *in vitro* (Ostrikova et al., 2018). В связи с плохим урожаем абрикоса в течение последних четырех лет и пораженностью семенного материала болезнями и вредителями, для введения в культуру *in vitro* использовали зародышевые оси 10 доступных образцов абрикоса. Установлено, что использование питательной среды Кнопа более эффективно для проращивания зародышевых осей. Уже на 3–5-е сутки появились зеленые листочки и отмечено интенсивное отрастание корня (рис. 4, А).

Процент введения в культуру *in vitro* в среднем составил 94,5% (табл. 4). На среде МС светло-зеленые листья появлялись на 6–7-е сутки, листочки были мельче, рост корня не был интенсивным (см. рис. 4, Б). Процент введения в культуру *in vitro* на среде МС в среднем составил 69,4%. В результате установлено, что использование среды Кнопа и МС эффективно для размножения в культуре тканей зародышевых осей абрикоса. Максимальную жизнеспособность (статистически значимую) зародыши абрикоса всех исследуемых генотипов проявляют на питательной среде без регуляторов роста (см. табл. 4). Полученный результат коррелирует с данными, полученными для других видов абрикоса (Ostrikova et al., 2018; Mitrofanova et al., 2020).

Следующим важным этапом для успешного микроклонального размножения послужил контроль пробирочных растений на наличие эндофитной контаминации на специализированной среде 523. Тестирование всех полученных побегов *in vitro* из зародышевых осей показало инфицирование только у образца № 42, где контаминация составила 1,1% (см. рис. 4, Д; табл. 4).

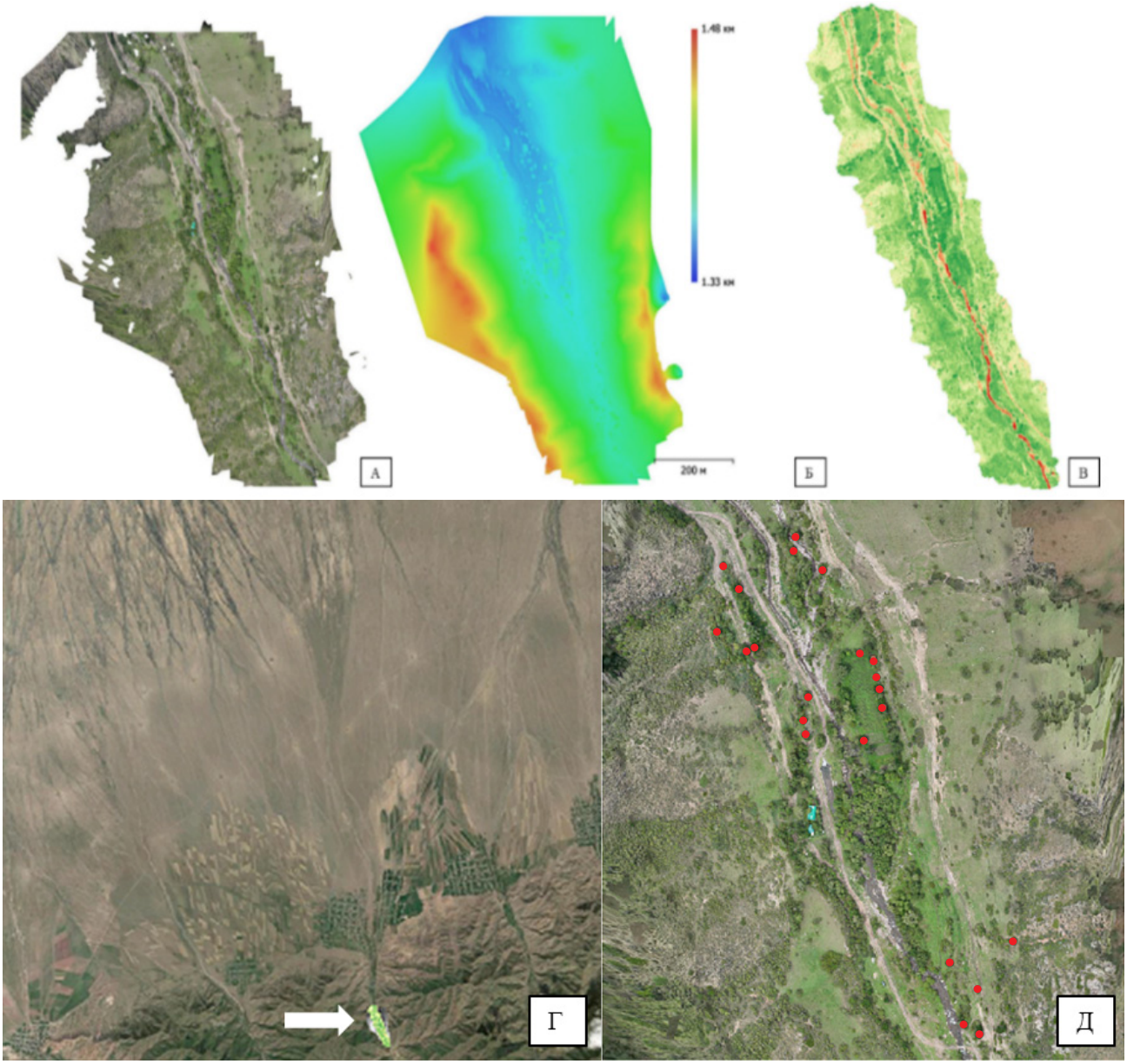


Рис. 3. Дистанционное зондирование территории произрастания *Prunus armeniaca* L. в ущелье Большой Аксу Уйгурского района Алматинской области: А – ортофотоплан; **Б** – карта высот (Digital Elevation Model, DEM); **В** – числовой показатель качества и количества растительности на участке NDVI; **Г** – карта размещения оцифрованного участка (показан стрелкой); **Д** – карта произрастания абрикоса (абрикос отмечен красными точками)

Fig. 3. Remote sensing of the *Prunus armeniaca* L. growing area in the Bolshoy Aksu Gorge, Uyghur District, Almaty Region: A – orthophotomap; **Б** – elevation map (Digital Elevation Model, DEM); **В** – numerical indicator of the quality and quantity of vegetation in the area, NDVI; **Г** – map of the location of the digitized area (shown by the arrow); **Д** – map of the apricot growing sites (apricot is marked with red dots)

При микроклональном размножении растений на коэффициент размножения большое влияние оказывает состав питательной среды. Существует разные варианты питательных сред для микроклонального размножения абрикоса, чаще всего используют питательную среду МС (Pérez-Tornero, Burgos, 2006; Golubev, 2017; Khafri et al., 2020; İpek et al., 2023). Учитывая литературные данные и личный опыт, была подобрана питательная среда МС с 10 вариантами регуляторов роста (см. табл. 2). Высокий коэффициент размножения 4,4 и 3,9 показали образцы № 17 и № 18 на среде МС5 (рис. 4, Е, Ж, З, И; табл. 5).

Достаточно высокий КР от 1,0 до 4,0 на питательной среде МС8 и от 1,0 до 3,6 на питательной среде МС10 получен и с концентрацией 0,8 мг/л БАП, 0,02 мг/л и 0,05 мг/л ИМК, 0,3 мг/л ГК. Увеличение концентрации ГК до 0,4 мг/л на среде МС6 привело к понижению КР до значений 1,0–2,7. Максимальный КР в диапазоне 1,6–4,4 получен на питательной среде МС5 с 1 мг/л БАП, 0,1 мг/л ИМК и 0,3 мг/л ГК.

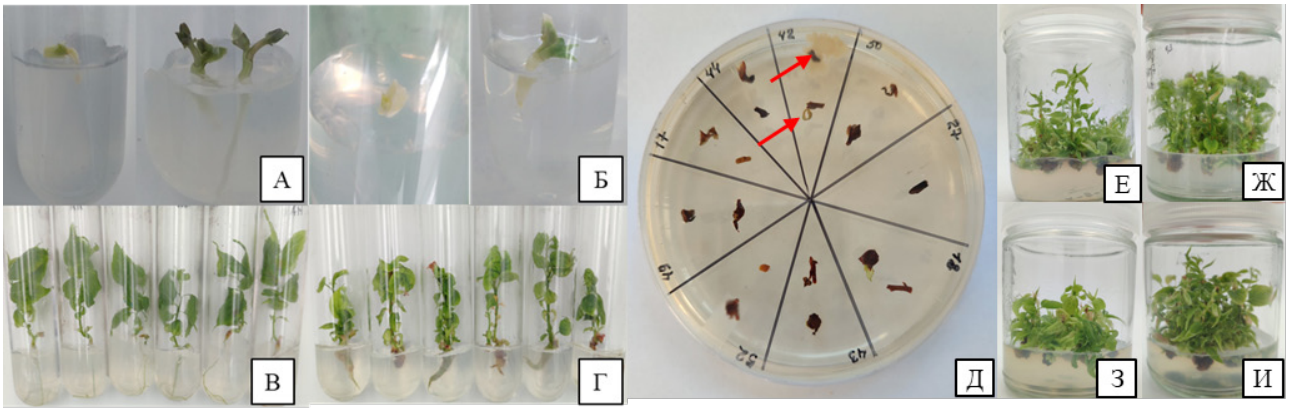


Рис. 4. Микроклональное размножение *Prunus armeniaca* L.:
А, **В** – на среде Кнопа; **Б**, **Г** – на среде МС; **Д** – красные стрелки указывают на инфицированные образцы на среде 523; **Е** – № 17 на среде МС4; **Ж** – № 17 на среде МС5; **З** – № 18 на среде МС4; **И** – № 18 на среде МС5

Fig. 4. Micropropagation of *Prunus armeniaca* L.:
А, **В** – on Knop's medium; **Б**, **Г** – on the MS medium; **Д** – red arrows indicate contaminated accessions on medium 523; **Е** – No. 17 on MS4; **Ж** – No. 17 on MS5; **З** – No. 18 on MS4; **И** – No. 18 on MS5

Таблица 4. Введение в культуру *in vitro* зародышевых осей *Prunus armeniaca* L.

Table 4. *In vitro* initiation of *Prunus armeniaca* L. embryonic axes

Образцы	Размножение ЗО на питательной среде Кнопа		Размножение ЗО на питательной среде МС		Процент асептических побегов после проверки на среде 523	
	Исходное количество ЗО / Жизнеспособные побеги, шт.	%	Исходное количество ЗО / Жизнеспособные побеги, шт.	%	Исходное количество побегов / количество асептических побегов, шт.	%
№ 17	18/16	88,9	17/14	82,4	30/30	100
№ 18	34/31	91,2	30/20	66,7	51/51	100
№ 27	5/5	100,0	–	–	5/5	100
№ 42	9/9	100,0	–	–	9/8	88,9
№ 43	8/6	75,0	8/6	75,0	12/12	100
№ 44	5/5	100,0	-	–	5/5	100
№ 49	10/9	90,0	15/8	53,3	17/17	100
№ 50	7/7	100,0	–	–	7/7	100
№ 52	8/8	100,0	–	–	8/8	100
№ 55	6/6	100,0	–	–	6/6	100
Сред. знач. ± ст. откл.		94,5 ± 8,3[a]		69,4 ± 12,5[b]		98,9 ± 3,5[a]

Примечание: ЗО – зародышевые оси; данные представляют собой среднее значение ± SE; значения, сопровождаемые различными буквами в каждом разделе, значительно различались при p ≤ 0,05 с использованием теста разделения средних Тьюки

Note: ЗО – embryonic axes; the data represent mean ± SE; values followed by different letters within each section were significantly different at p ≤ 0.05 using Tukey's mean separation test

Таблица 5. **Коэффициент размножения *in vitro* побегов абрикоса на различных вариантах питательной среды МС**

Table 5. **Multiplication rates of *in vitro* apricot shoots on different variants of the MS medium**

Образцы	№ 17	№ 18	№ 27	№ 42	№ 43	№ 44	№ 49	№ 50	№ 52	№ 55
ИКП, шт.	26	34	20	36	24	28	36	28	24	20
КП4Н на МС1, шт.	40	68	20	92	52	48	124	28	60	40
КР	1,5	2,0	1,0	2,6	2,2	1,7	3,4	1,0	2,5	2,0
ИКП, шт.	26	34	24	30	36	42	36	30	36	30
КП4Н на МС2, шт.	37	69	96	45	84	84	100	90	54	30
КР	1,4	2,0	4,0	1,5	2,3	2,0	2,8	3,0	1,5	1,0
ИКП, шт.	42	51	36	30	30	48	42	36	30	39
КП4Н на МС3, шт.	99	114	60	48	81	60	81	60	36	45
КР	2,4	2,2	1,7	1,6	2,7	1,3	1,9	1,7	1,2	1,3
ИКП, шт.	33	51	30	36	30	42	42	30	36	36
КП4Н на МС4, шт.	108	135	75	54	105	54	81	54	48	63
КР	3,2	2,6	2,5	1,5	3,5	1,3	1,9	1,8	1,3	1,8
ИКП, шт.	28	28	24	20	24	20	32	24	20	20
КП4Н на МС5, шт.	124	108	60	40	88	56	100	48	50	32
КР	4,4	3,9	2,5	2,0	3,7	2,8	3,1	2,0	2,5	1,6
ИКП, шт.	54	90	36	36	90	27	23	36	27	27
КП4Н на МС6, шт.	103	90	16	36	90	45	63	45	35	27
КР	1,9	1,0	2,3	1,0	1,0	1,6	2,7	1,3	1,3	1,0
ИКП, шт.	54	54	27	27	81	28	27	29	27	27
КП4Н на МС7, шт.	60	81	108	54	150	28	30	29	36	102
КР	1,1	1,5	4,0	2,0	1,9	1,0	1,1	1,0	1,3	3,8
ИКП, шт.	39	81	27	27	54	36	27	45	27	18
КП4Н на МС8, шт.	54	171	87	57	216	104	84	45	87	58
КР	1,4	2,1	3,2	2,1	4,0	2,9	3,1	1,0	3,2	3,2
ИКП, шт.	36	45	27	45	36	36	27	54	35	27
КП4Н на МС9, шт.	72	55	87	50	128	36	87	54	35	90
КР	2,0	1,2	3,2	1,1	3,6	1,0	3,2	1,0	1,0	3,3
ИКП, шт.	27	36	25	27	27	45	36	45	32	36
КП4Н на МС10, шт.	66	92	50	63	103	50	84	160	32	112
КР	2,4	2,6	2,0	2,3	3,8	1,1	2,3	3,6	1,0	3,1

Примечание: исходное количество побегов (ИКП), шт.; количество побегов после 4 недель (КП4Н) на МС1, шт.

Note: initial number of shoots (ИКП), pcs.; number of shoots after 4 weeks (КП4Н) on MS1, pcs.

Выводы

Описание популяций современными геоботаническими методами позволили установить реальное состояние дикорастущих лесных массивов *P. armeniaca*. Выявлена высокая поражаемость деревьев до 52,6% (некроз, повреждения насекомыми, лишайниками, грибные заболевания). В первой популяции и в двух точках второй популяции отсутствовало плодоношение.

С помощью дистанционного зондирования составлены карта размещения оцифрованного участка на территории ущелья Большой Аксу Уйгурского района Алматинской области и карта произрастания абрикоса. Определена локация массового произрастания абрикоса, размечена изучаемая площадь, создан ортофотоплан, получена ЦМР, установлен NDVI в значениях от 0,3 до 0,7, что соответствует средним показателям. Полученные данные могут быть использованы в географических информационных системах (ГИС), для моделирования ландшафта, наводнений или дренажа, исследований землепользования и геологических приложений.

Установлено, что использование питательной среды Кнопа более эффективно (94,5%) для проращивания зародышевых осей в культуре *in vitro*, чем среда МС (69,4%). Тестирование полученных побегов *in vitro* на среде 523 показало крайне низкий процент контаминации (1,1%), что говорит о низком проценте зараженности исходного материала. Максимальный коэффициент размножения в диапазоне 1,6–4,4 получили на питательной среде МС5 с 1 мг/л БАП, 0,1 мг/л ИМК и 0,3 мг/л ГК. Полученная *in vitro* коллекция впоследствии будет использована для проведения SSR-маркирования биоразнообразия дикорастущих популяций *P. armeniaca*, а также для получения саженцев, которые используют для восстановления деградирующих популяций.

References / Литература

Abdalla N., El-Ramady H., Seliem M.K., El-Mahrouk M.E., Taha N., Bayoumi Y. et al. An academic and technical overview on plant micropropagation challenges. *Horticulturae*. 2022;8(8):677. DOI: 10.3390/horticulturae8080677

Alzubi H., Yepes L.M., Fuchs M. *In vitro* storage of micropropagated grapevine rootstocks at low temperature. *In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant*. 2019;55(3):334-341. DOI: 10.1007/s11627-019-09980-8

Balenović I., Marjanović H., Vuletić D., Paladinić E., Ostrogović Sever M.Z., Indir K. Quality assessment of high-density digital surface model over different land cover classes. *Periodicum Biologorum*. 2015a;117(4):459-470. DOI: 10.18054/pb.2015.117.4.3452

Balenović I., Seletković A., Pernar R., Jazbec A. Estimation of the mean tree height of forest stands by photogrammetric measurement using digital aerial images of high spatial resolution. *Annals of Forest Research*. 2015b;58(1):125-143. DOI: 10.15287/afr.2015.300

Balla I., Vértesy J. *In vitro* culture of Hungarian apricot (*Prunus armeniaca* L.) varieties. *Acta Horticulturae*. 2000;560:395-398. DOI: 10.17660/ActaHortic.2001.560.75

Chaudhury R., Malik S.K. Cryopreservation of plant species: Practical approaches from handling to cryobanking. New Delhi: ICAR – NBPGR; 2017. Available from: http://www.nbpgr.ernet.in:8080/cryobank/img/books/Cryo_Preservation_of_Plant_Species.pdf [accessed Jan. 21, 2025].

Coelho N., Gonçalves S., Romano A. Endemic plant species conservation: Biotechnological approaches. *Plants*. 2020;9(3):345. DOI: 10.3390/plants9030345

Dunaeva S.E., Antonova O.Y., Pendinen G.I., Shvachko N.A., Gavrilenko T.A. Maintenance of genetic diversity of vegetatively propagated plant crops under controlled environment at the VIR. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2012;169:245-256. [in Russian] (Дунаева С.Е., Антонова О.Ю., Пендинен Г.И., Швачко Н.А., Гавриленко Т.А. Сохранение генетического разнообразия вегетативно размножаемых культур растений в контролируемых условиях среды в ВИРе. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2012;169:245-256).

Dzhangaliev A.D., Salova T.N., Turekhanova P.M. The wild fruit and nut plants of Kazakhstan. In: J. Janick (ed.). *Horticultural Reviews. Vol. 29. Wild Apple and Fruit Trees of Central Asia*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.; 2003. p.305-371. DOI: 10.1002/9780470650868.ch3

Dzhangaliev A.D., Salova T.N., Turekhanova R.M. Wild fruit plants of Kazakhstan. Almaty; 2001. [in Russian] (Джангалиев А.Д., Салова Т.Н., Туреханова Р.М. Дикие плодовые растения Казахстана. Алматы; 2001).

Engelmann F. Use of biotechnologies for the conservation of plant biodiversity. *In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant*. 2011;47(1):5-16. DOI: 10.1007/s11627-010-9327-2

FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Food and agriculture data: [website]. Available from: https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL [accessed Jan. 21, 2025].

Gavrilenko T.A., Dunayeva S.E., Truskinov E.V., Antonova O.Y., Pendinen G.I., Lupysheva J.V. et al. A strategy of long-term conservation of vegetatively propagated crops under controlled conditions. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2007;164:273-285. [in Russian] (Гавриленко Т.А., Дунаева С.Е., Трускинов Э.В., Антонова О.Ю., Пендинен Г.И., Лупышева Ю.В. и др. Стратегия долгосрочного сохранения генофонда вегетативно размножаемых сельскохозяйственных растений в контролируемых условиях среды. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2007:164:273-285).

GISGeography. What is NDVI (Normalized Difference Vegetation Index): [website]. Available from: https://gisgeography.com/ndvi-normalized-difference-vegetation-index [accessed Oct. 11, 2024].

Golubev A.M. Clonal micropropagation of some apricot genotypes in the culture of apical meristems and leaf cuttings. *Works of the State Nikita Botanical Gardens*. 2017;144(2):64-69. [in Russian] (Голубев А.М. Клональное микроразмножение некоторых генотипов абрикоса в культуре апикальных меристем и высечек листьев. *Сборник научных трудов Государственного Никитского ботанического сада*. 2017;144(2):64-69).

Groppi A., Liu S., Cornille A., Decroocq S., Bui Q.T., Tricon D. et al. Population genomics of apricots unravels domestication history and adaptive events. *Nature Communications*. 2021;12(1):3956. DOI: 10.1038/s41467-021-24283-6

İpek M., Arıkan Ş., Eşitken A., Aras S. Effect of different hormones concentration on *in vitro* regeneration of apricot cultivars. *Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technology*. 2023;11(8):1372-1379. DOI: 10.24925/turjaf.v11i8.1372-1379.6194

Jenderek M.M., Reed B.M. Cryopreserved storage of clonal germplasm in the USDA National Plant Germplasm Sys-

tem. *In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant*. 2017;53(4):299-308. DOI: 10.1007/s11627-017-9828-3

Jiang F., Zhang J., Wang S., Yang L., Luo Y., Gao S. et al. The apricot (*Prunus armeniaca* L.) genome elucidates Rosaceae evolution and beta-carotenoid synthesis. *Horticulture Research*. 2019;6(1):128. DOI: 10.1038/s41438-019-0215-6

Khafri A.Z., Solouki M., Zarghami R., Fakheri B.A., Mahdinezhad N., Naderpour M. *In vitro* propagation of three Iranian apricot cultivars. *In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant*. 2020;57(1):1-16. DOI: 10.1007/s11627-020-10112-w

Knop W. Quantitative Utersuchungen Über den Ernährungensprozeß der Pflanze. *Landwirtschaftliche Versuchsstation*. 1865;7:93. [in German]

Kokoreva I.I., Otradnykh I.G., Syedyna I.A., Lysenko V.V. Rare plant species of the Northern Tien Shan. Almaty; 2013. [in Russian] (Кокорева И.И., Отрадных И.Г., Съедина И.А., Лысенко В.В. Редкие виды растений Северного Тянь-Шаня. Алматы; 2013).

Kovalchuk I., Turdiyev T., Mukhitdinova Z., Frolov S., Reed B.M. Cryopreservation of native Kazakhstan apricot (*Prunus armeniaca* L.) seeds and embryonic axes. *CryoLetters*. 2014;35(2):83-89.

Kovalchuk I.Y., Mukhitdinova Z.R., Turdiyev T.T., Madiyeva G.A., Reed B.M. Optimization of *in vitro* growth medium for a wild Kazakhstan apricot, *Prunus armeniaca. Acta Horticulturae*. 2017:1155:193-199. DOI: 10.17660/ActaHortic.2017.1155.27

Kushnarenko S.V., Romadanova N.V., Aralbayeva M.M. Current state and *in vitro* conservation of the only endangered population of *Corylus avellana* in Kazakhstan. *Research on Crops*. 2020;21(4):681-686. DOI: 10.31830/2348-7542.2020.106

Kushnarenko S.V., Rymkhanova N.K, Aralbayeva M.M., Romadanova N.V. *In vitro* cold acclimation is required for successful cryopreservation of *Juglans regia* L. shoot tips. *CryoLetters*. 2023;44(4):240-248. DOI: 10.54680/fr23410110612

Lalso V., Onet A., Vicas S., Agud E., Onet C. *In vitro* propagation of apricot (*Prunus armeniaca* L.). *Annals of the University of Oradea, Fascicle: Environmental Protection*. 2018:30:197-202. Available from: https://protmed.uoradea.ro/facultate/publicatii/protectia_mediului/2018A/im/05.%20Laslo%20Vasile.pdf [accessed Jan. 21, 2025].

Lateur M., Dapena E., Szalatnay D., Gantar M.E., Guyader A., Hjalmarsson I., Höfer M., Ikase L., Kellerhals M., Lacis G., Militaru M., Miranda Jiménez C., Osterc G., Rondia A., Volens K., Zeljković M.K., Ordidge M. ECPGR characterization and evaluation descriptors for apple genetic resources. Apple (*Malus* × *domestica*). Rome: ECPGR; 2022. Available from: https://www.ecpgr.org/fileadmin/bioversity/publications/pdfs/2022_ECPGR_Malus_descriptors_final.pdf [accessed Jan. 21, 2025].

Mitrofanova I.V., Mitrofanova O.V., Lesnikova-Sedoshenko N.P., Chelombit S.V., Gorina V.M., Chirkov S.N. Some features of obtaining new breeding forms of apricot *in vitro. Acta Horticulturae*. 2020;1290:237-242. DOI: 10.17660/ActaHortic.2020.1290.42

Mukanova G.S., Smailova M.K., Sankaibaeva A.G., Shadmanova L.Sh. Analysis of phenological, pomological and biochemical characteristics of wild apricot in Kazakhstan. *Acta Horticulturae*. 2024;1387:217-224. DOI: 10.17660/ActaHortic.2024.1387.29

Murashige T., Skoog F.A. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*. 1962;15(3):473-497. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x

Ostrikova O.V., Fedotova I.E., Kharkhardina E.L. Studing of the nutrient medium hormonal composition influence on the morphogenesis of apricot embryos *in vitro* culture. *Breeding and Variety Cultivation of Fruit and Berry Crops*. 2018;5(1):93-96. [in Russian] (Острикова О.В., Федотова И.Э., Хархардина Е.Л. Изучение влияния гормонального состава питательной среды на морфогенез зародышей абрикоса обыкновенного в культуре *in vitro*. *Селекция и сорторазведение садовых культур*. 2018;5(1):93-96).

Pérez-Tornero O., Burgos L. Apricot micropropagation. In: S.M. Jain, H. Häggman (eds). *Protocols for Micropropagation of Woody Trees and Fruits*. Dordrecht: Springer; 2006. p.267-278. DOI: 10.1007/978-1-4020-6352-7_25

Red Data Book of Kazakhstan. Vol. 2. Plants. 2nd ed. Astana: ArtPrintXXI; 2014. [in Russian] (Красная книга Казахстана. Т. 2. Растения. 2-е изд. Астана: АртPrintXXI; 2014).

Romadanova N., Kushnarenko S., Karasholakova L. Development of a common PVS2 vitrification method for cryopreservation of several fruit and vegetable crops. *In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant*. 2017;53(4):382-393. DOI: 10.1007/s11627-017-9849-y

Romadanova N.V., Aralbayeva M.M., Zemtsova A.S., Alexandrova A.M., Kazybayeva S.Zh., Mikhailenko N.V. et al. *In vitro* collection for the safe storage of grapevine hybrids and identification of the presence of *Plasmopora viticola* resistance genes. *Plants*. 2024;13(8):1089. DOI: 10.3390/plants13081089

Romadanova N.V., Kushnarenko S.V. Conservation of plant biodiversity by biotechnology methods. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(1):239-248. [in Russian] (Ромаданова Н.В., Кушнаренко С.В. Сохранение биоразнообразия растений методами биотехнологии. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(1):239-248). DOI: 10.30901/2227-8834-2023-1-239-248

Romadanova N.V., Mishustina S.A., Matakova G.N., Kushnarenko S.V., Rakhimbaev I.R., Reed B.M. *In vitro* collection of *Malus* shoot cultures for cryogenic bank development in Kazakhstan. *Acta Horticulturae*. 2016;1113:271-277. DOI: 10.17660/ActaHortic.2016.1113.40

Romadanova N.V., Tolegen A.B., Kushnarenko S.V., Zholdybayeva E.V., Bettoni J.C. Effect of Plant Preservative Mixture™ on endophytic bacteria eradication from *in vitro*-grown apple shoots. *Plants (Basel)*. 2022;11(19):2624. DOI: 10.3390/plants11192624

Rotach P. EUFORGEN Technical Guidelines for genetic conservation and use for service tree (*Sorbus domestica*). Rome: IPGRI; 2003. Available from: https://www.euforgen.org/fileadmin/templates/euforgen.org/upload/Publications/Technical_guidelines/Technical_guidelines_Sorbus_domestica.pdf [accessed Jan. 21, 2025].

Šiško M., Ternjak T., Grobelnik-Mlakar S. The effects of different cytokinin types and their concentration on *in vitro* growth of apricot (*Prunus armeniaca* L.) shoots. *Agricultura*. 2022;19(1):1-6. DOI: 10.18690/agricultura.19.1.1-6.2022

Soliman H.I.A. *In vitro* propagation of apricot (*Prunus armeniaca* L.) and assessment of genetic stability of micropropagated plants using RAPD analysis. *World Applied Sciences Journal*. 2012;19(5):1818-4952. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2012.19.05.2770

SYSTAT 13.0.5: [website]. Available from: https://systat.informer.com/13.0 [accessed Jan. 21, 2025].

Trigiano R.N., Gray D.J. (eds). Plant tissue culture, development, and biotechnology. Boca Raton, FL: CRC Press; 2011. DOI: 10.1201/9781439896143

Viss P.R., Brooks E.M., Driver J.A. A simplified method for the control of bacterial contamination in woody plant tissue culture. *In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant*. 1991;27(1):42. DOI: 10.1007/BF02632060

Weier J., Herring D. Measuring vegetation (NDVI & EVI). NASA Earth Observatory; 2000. Available from: https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation [accessed Oct. 10, 2024].

Zaurov D.E., Molnar T., Eisenman S.W., Ford T.M., Mavlyanova R.F., Capik J.M. et al. Genetic resources of apricots (*Prunus armeniaca* L.) in Central Asia. *HortScience*. 2013;48(6):681-691. DOI: 10.21273/HORTSCI.48.6.681

Информация об авторах

Назира Алтайқызы Алтаева, старший научный сотрудник, Институт биологии и биотехнологии растений, 050040 Казахстан, Алматы, ул. Тимирязева, 45, altnazira@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-5039-8999

Алина Сергеевна Земцова, младший научный сотрудник, Институт биологии и биотехнологии растений, 050040 Казахстан, Алматы, ул. Тимирязева, 45, zemtsovaaalina@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0258-9448

Наталья Анатольевна Артимович, лаборант, Институт биологии и биотехнологии растений, 050040 Казахстан, Алматы, ул. Тимирязева, 45, artimovich_nata@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-5354-8069

Арман Болатханулы Толеген, старший научный сотрудник, Институт биологии и биотехнологии растений, 050040 Казахстан, Алматы, ул. Тимирязева, 45, докторант, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, 050040 Казахстан, Алматы, пр. Аль-Фараби, 71, tolegenarman7@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-3747-2330

Светлана Вениаминовна Кушнаренко, кандидат биологических наук, профессор, заведующая лабораторией, Институт биологии и биотехнологии растений, 050040 Казахстан, Алматы, ул. Тимирязева, 45, svetlana_bio@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1926-0091

Наталья Владимировна Ромаданова, кандидат биологических наук, ассоциированный профессор, ведущий научный сотрудник, Институт биологии и биотехнологии растений, 050040 Казахстан, Алматы, ул. Тимирязева, 45, nata_romadanova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1052-2753

Information about the authors

Nazira A. Altayeva, Senior Researcher, Institute of Plant Biology and Biotechnology, 45 Timiryazev St., Almaty 050040, Kazakhstan, altnazira@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-5039-8999

Alina S. Zemtsova, Associate Researcher, Institute of Plant Biology and Biotechnology, 45 Timiryazev St., Almaty 050040, Kazakhstan, zemtsovaaalina@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0258-9448

Natalya A. Artimovich, Laboratory Assistant, Institute of Plant Biology and Biotechnology, 45 Timiryazev St., Almaty 050040, Kazakhstan, artimovich_nata@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-5354-8069

Arman B. Tolegen, Senior Researcher, Institute of Plant Biology and Biotechnology, 45 Timiryazev St., Almaty 050040, Kazakhstan, PhD Student, al-Farabi Kazakh National University, 71 al-Farabi Ave., Almaty 050040, Kazakhstan, tolegenarman7@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-3747-2330

Svetlana V. Kushnarenko, Cand. Sci. (Biology), Professor, Head of a Laboratory, Institute of Plant Biology and Biotechnology, 45 Timiryazev St., Almaty 050040, Kazakhstan, svetlana_bio@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1926-0091

Natalya V. Romadanova, Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Leading Researcher, Institute of Plant Biology and Biotechnology, 45 Timiryazev St., Almaty 050040, Kazakhstan, nata_romadanova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1052-2753

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 31.01.2025; одобрена после рецензирования 29.05.2025; принята к публикации 11.08.2025.
The article was submitted on 31.01.2025; approved after reviewing on 29.05.2025; accepted for publication on 11.08.2025.

MOBILIZATION AND CONSERVATION OF THE GENETIC DIVERSITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article
UDC 58:001.83:93/94(47+57+44)
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-23-36

CC BY

Enrichment of the VIR herbarium collection with materials from France and its subordinate territories in the 1920–1930s

Larisa V. Bagmet[1], Elizaveta S. Khablova[2]

[1] *N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia*

[2] *S.I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg Branch, St. Petersburg, Russia*

Corresponding author: Larisa V. Bagmet, l.bagmet@vir.nw.ru

Since its establishment, the Herbarium of Cultivated Plants of the World, Their Wild Relatives, and Weeds (the VIR Herbarium, WIR) has fully embodied the Institute's primary mission: to build a comprehensive collection representing the global diversity of cultivated plants. One of the most active periods of collection growth occurred in the 1920s and 1930s, while N. I. Vavilov was at the head of the Institute. It was the time when VIR organized numerous collecting missions worldwide and enthusiastically fostered international collaboration. This article examines the herbarium specimens that arrived between the 1920s and 1930s from France and its dependent territories (Algeria, Morocco, Tunisia, and the French Mandate for Syria and the Lebanon) and their sources. More than half of the specimens (2,765) represent various species and varieties of wheat, barley, goatgrass, vetch, peavine, and flax, with grapevines also well represented (100–400 specimens). The most valuable part of the collection consists of herbarium specimens collected directly from their natural habitats (originals), totaling 246 items. The remaining 3,948 specimens were collected from the experimental fields of VIR's departments where they had been grown from seeds originally obtained in those countries. Vavilov's collecting mission to the Mediterranean region (June 1926 – August 1927) supplied nearly 90% of the specimens to the VIR Herbarium. In addition to the collected samples, specimens were acquired from various scientific institutions, including botanical gardens, seed companies, and research centers, as well as from personal plant holdings of French scientists, such as Louis Blaringhem, Louis Charles Trabut, Léon Octave Ducellier, Émile Miège, and Félicien Boeuf.

Keywords: VIR Herbarium (WIR), N. I. Vavilov, herbarium specimen, France, scientific cooperation

Acknowledgements: the research was carried out within the framework of the state tasks assigned to the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), Project No. FGEM-2022-0006 "Disclosing the scientific potential of the herbarium collection at VIR as an independent specific unit of worldwide agricultural biodiversity conservation for scientifically justified mobilization, effective studying and preservation of genetic diversity", using the holdings of the Herbarium of Cultivated Plants of the World, Their Wild Relatives, and Weeds (WIR), and to the S.I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology of the RAS, Project No. 125031103505-6 "History of fundamental biology in the 20th century: interrelation of domestic and international research practices".
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Bagmet L.V., Khablova E.S. Enrichment of the VIR herbarium collection with materials from France and its subordinate territories in the 1920–1930s. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(3):23-36. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-23-36

© Bagmet L.V., Khablova E.S., 2025

МОБИЛИЗАЦИЯ И СОХРАНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-23-36

Пополнение гербарной коллекции ВИР из Франции и подконтрольных ей территорий в 20–30-е годы XX века

Л. В. Багмет[1], Е. С. Хаблова[2]

[1] *Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия*

[2] *Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова Российской академии наук, Санкт-Петербургский филиал, Санкт-Петербург, Россия*

Автор, ответственный за переписку: Лариса Владимировна Багмет, l.bagmet@vir.nw.ru

С момента своего создания Гербарий культурных растений мира, их диких родичей и сорных растений (Гербарий ВИР, WIR) полностью отражает главную задачу учреждения в целом – создание коллекции образцов мировой культурной флоры во всем ее многообразии. Одним из наиболее активных периодов пополнения коллекции стали 20–30-е годы XX века, когда институтом руководил Н. И. Вавилов. Именно в это время ВИР организует множество экспедиций по всему миру и активно налаживает международное сотрудничество. В статье проанализированы гербарные образцы и источники их поступления в гербарную коллекцию из Франции и подконтрольных ей территорий (Алжир, Марокко, Тунис, Французский мандат в Сирии и Ливане) в 20–30-е годы XX века. Более половины образцов (2765) составляют виды и разновидности пшеницы, также преобладают ячмень, эгилопс, вика, чина, лен, виноград (от 100 до 400 образцов). Самая ценная часть коллекции – гербарные образцы, на которых представлены растения, собранные непосредственно в местах их произрастания (оригиналы): таких образцов в коллекции 246. Остальные образцы (3948) собраны на опытных полях отделений ВИР с растений, выращенных из оригинальных семян. Почти 90% поступили в Гербарий ВИР по результатам средиземноморской экспедиции Н. И. Вавилова (июнь 1926 – август 1927 г.). Помимо экспедиции, образцы поступали из различных научных учреждений (ботанические сады, семенные компании, исследовательские центры), а также из персональных сборов французских ученых (Луи Бларингем, Луи Шарль Трабю, Леон Октав Дюселье, Эмиль Мьеж и Фелисьен Беф).

Ключевые слова: Гербарий ВИР (WIR), Н. И. Вавилов, гербарный образец, Франция, научное сотрудничество

Благодарности: работа выполнена в рамках государственных заданий Всероссийскому институту генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР) по проекту № FGEM-2022-0006 «Раскрытие научного потенциала гербарной коллекции ВИР как особой специфической единицы хранения мирового агробиоразнообразия для научно обоснованной мобилизации, эффективного изучения и сохранения генофонда культурных растений и их диких родичей» с использованием фондов Гербария культурных растений мира, их диких родичей и сорных растений (WIR) и Институту истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН, проект № 125031103505-6 «История фундаментальной биологии в XX веке: взаимосвязь отечественных и международных практик исследований».
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Багмет Л.В., Хаблова Е.С. Пополнение гербарной коллекции ВИР из Франции и подконтрольных ей территорий в 20–30-е годы XX века. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(3):23-36. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-23-36

The Herbarium of Cultivated Plants of the World, Their Wild Relatives, and Weeds (WIR) at the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR) is a unique collection dedicated primarily to the preservation of cultivated plant varieties. Its foundation at the Bureau of Applied Botany[1] was laid by the personal collections of A. I. Maltsev and R. E. Regel in the late 19th and early 20th centuries. Initially, the collection primarily included specimens of species, varieties, and forms of domestically cultivated plant populations, as well as weed species. By 1910, the herbarium contained over 12 000 sheets from more than 6000 locations (Borkovskaya, Voskanyan, 1969). The most significant growth of the collection began after 1920, when N. I. Vavilov became the head of the Department of Applied Botany. He envisioned the herbarium as a comprehensive representation of the global diversity of cultivated plants, systematically and geographically arranged (Vavilov, 1924). Under Vavilov's leadership, VIR became one of the leading institutions within the USSR's network of agricultural research institutes and centers (Vavilov, 1990). The herbarium collection expanded substantially through systematic collection missions, exchanges with Soviet institutes, and collaborations with foreign scientific centers and private organizations. One of the most significant international collaborations was with France.

Our study focuses on identifying herbarium specimens from France and its controlled territories that were received by the VIR Herbarium in the 1920s and 1930s. Given that the main fund of the VIR Herbarium contains over 132 000 specimens, our analysis concentrated on the plant families most relevant to the agricultural regions of interest.

Scientific cooperation between Russia and France dates back to the 18th century (Khablova, 2024). Despite communication challenges in the early 20th century, the USSR and France enabled the continuation of scientific exchange (Fando, 2023). Institutional ties were further reinforced through personal connections among scientists, many of which had been maintained since the prerevolutionary period. This was particularly relevant for such Soviet professors who had trained in Europe (Aleksandrov, 1996), as K. A. Flaxberger, E. V. Wulff, L. I. Govorov, and others. In 1914, N. I. Vavilov completed an internship in France at the seed company Vilmorin-Andrieux et Cie, which played a key role in establishing scientific collaboration between VIR and French botanical and agronomic institutions. Vavilov maintained close relationships with many leading French agronomists of that time, engaged in regular correspondence with them, and exchanged plant materials, thereby significantly enriching the Institute's collections (Vavilov, 1994).

The Mediterranean region had long been of great interest to N. I. Vavilov. At the intersection of the Mediterranean and West Asian centers of cultivated plant diversity he saw a vast opportunity to further test the theoretical conclusions of his theory on the centers of origin of cultivated plants. One of Vavilov's largest collection missions began in France and extended across several its subordinate territories, including Algeria, Tunisia, Morocco, and the French Mandate for Syria and the Lebanon (Goncharov, 2012). Between June 1926 and August 1927, Vavilov undertook an extensive journey across Mediterranean countries with the aim of collecting the most comprehensive material possible on local crop varieties, studying the history of agriculture, and analyzing the conditions of farming practices. This region particularly attracted him due to its remarkable concentration of species diversity and its deep-rooted agronomic traditions (Vavilov, 1987). Vavilov's scientific and personal connections played a crucial role in both the preparation and execution of the collection mission. To carry out his research plan, obtaining visas was essential. However, this process was complicated by the diplomatic relations between the Soviet Union and France. Numerous documents related to Vavilov's Mediterranean collection mission were found in the Diplomatic Archives at La Courneuve (Centre des Archives diplomatiques de La Courneuve). Among them was a letter by Lucien Saint, the French General Resident in Tunisia at that time, dated September 21, 1925, addressed to the Minister of Foreign Affairs (FRMAE 53CPCOM…, 1918–1940). In this letter, L. Saint affirmed that all accommodations needed for the mission in Tunisia were arranged and ready to be provided. However, French authorities deemed it necessary to clarify Vavilov's political stance. Furthermore, the French representative in Petrograd was asked whether the Soviet scientist confined his activities to research or engaged himself in propaganda, which was considered particularly inappropriate in North Africa and Middle East at the time. During this period, Vavilov also conducted research in the southeastern regions of France, ultimately concluding that the Mediterranean coast had historically provided ideal conditions for the development of major agricultural crops (Vavilov, 1987).

The issue of securing travel permits was resolved largely due to the assistance of Madame Philippe de Vilmorin[2], head of the Vilmorin-Andrieux & Cie seed company. She personally met the French Minister of Foreign Affairs Aristide Briand and Prime Minister Raymond Poincaré to advocate for Vavilov's journey (Vishnyakova, Loskutov, 2018). Additional support came from French botanical institutions, notably from the renowned professor Auguste Chevalier, director of the Institute of Applied Botany. Vavilov had developed a strong collaboration with Chevalier on desert reclamation efforts. As a result, permission to visit French colonial territories was granted.

Between July and August 1926, Vavilov's collection mission conducted extensive research across North African countries, including Algeria, Morocco, and Tunisia.

The route through Algeria was planned in collaboration with L. C. Trabut, L. O. Ducellier, and the Ministry of Agriculture. Major Saharan oases, as well as the regions of Sétif, Timgad, Tiaret, and the mountainous areas of Algeria – key centers for the cultivation of cereal crops, particularly durum wheat – were surveyed. Trabut and Ducellier's expertise played a crucial role in selecting valuable varietal material and deepening the understanding of evolutionary processes shaping North Africa's cultivated flora (Vavilov, 1987). In Algeria, fieldwork was conducted in the vicinity of Biskra, Blida, Khirane, Lambaesis, Mechtet er-Radj, Michelet, Oran, Orléansville (now Chlef), Sétif, Philippeville (now Skikda), Tlemcen, Frenda, Fort National (now Larbaâ Nath Irathen), and Maison-Carrée (now El Harrach). The expedition collected specimens of wheat, goatgrass, and barley (both herbarium samples and seeds), along with seeds of oats, flax, cotton, peavine, vetch, cowpea, broad bean, beet, tobacco, groundcherry, and melon.

In Morocco, Vavilov visited the Agricultural Research Department in Rabat, where he met its director, Dr. Émile Miège. Miège shared his expertise on the country's cultivated flora and provided collection samples. The collection mission identified a remarkable diversity of cultivated plants, predominantly cereals and legumes, in the Atlas Mountains region.

[1] VIR has been renamed several times since its foundation: Bureau of Applied Botany (1894); Department of Applied Botany and Breeding (1917); All-Union Institute of Applied Botany and New Crops (1924); All-Union Institute of Plant Industry (1930); currently the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR).

[2] Her maiden name was Berthe Marie Mélanie de Gaufridy de Dortan.

Surveys were conducted near Kasba Tadla, Marrakech, Rabat, Taza, Fez, and Oujda. Near Taza, N. I. Vavilov gathered seeds of a small-fruited, semi-cultivated melon known for its resistance to pests and diseases. A herbarium specimen was later grown at the Turkestan Breeding Station from these original seeds (Fig. 1). Additionally, the collection mission collected samples of wheat, goatgrass, oats, barley (both original and reproduced specimens), sorghum, flax, vetch, cowpea, broad bean, hemp, melon, cotton, and onion (reproduced specimens).

Upon arriving in Tunisia, Vavilov met with Professor Félicien Boeuf, director of the Colonial School of Agriculture in Tunisia and a researcher specializing in cultivated plants. Boeuf had prepared the Tunisian segment of the expedition's route in advance. Together, they traveled into the interior of the country to survey its major agricultural regions, including Ariana, Béja, El Kef, Siliana, and El Ksour. Vavilov particularly noted the exceptional composition of Tunisia's ancient durum wheat varieties, which were characterized by diverse mixtures of multiple forms. The expedition collected herbarium

Fig. 1. Herbarium specimen of small-fruited melon from Morocco (WIR-53006)
Рис. 1. Гербарный образец мелкоплодной дыни из Марокко (WIR-53006)

of oat, as well as original and reproduced samples of wheat, goatgrass, and barley. Additionally, specimens of cotton, flax, vetch, cowpea, broad bean, peavine, hemp, and beet (reproduced samples) were brought back from Tunisia.

Between July 1925 and June 1927, insurgent Druze[3] mountain tribes were engaged in a guerrilla war against French forces in Syria, launching successful offensives. The entire highland region south and southeast of Beirut was under military rule. Despite these challenges, it was crucial for N. I. Vavilov to reach the southern part of the country, particularly the highlands of Houran, where wild wheat was known to grow. While the collection mission did confirm the presence of wild wheat, Vavilov was even more intrigued by a unique subspecies of cultivated wheat found in the region. This wheat, later named "Hourani wheat" (*Triticum durum* Desf. subsp. *horanica* (Vav.) Vav. var. *horanoleucurum* Vav. et Jakubz.), displayed exceptional drought resistance, large grains, a sturdy, non-lodging stalk, and a compact spike (Vavilov, 1987). The flora of Syria and Lebanon demonstrated an extraordinary wealth of wild relatives of cultivated plants. Surveys were conducted in the vicinities of Hama, Homs, Hauran, Suwayda, Aleppo, Behi, Mount Hermon, Damascus, Idlib, Daraa, Lattakia, Maras, Salamiyah, Baalbek, Beirut, Bsharri, and Brummana. Samples from the arid steppe regions of northern Syria were of particular interest for the dry southern regions of the USSR. Collected samples from this region included herbarium specimens of rye, as well as of wheat, oats, cotton, goatgrass, barley (original and reproduced samples), and reproductions of vetch, hemp, peavine, flax, cowpea, broad bean, cucumber, beet, sorghum, onion, melon, and sesame.

The collection mission was originally planned to last six to eight months but ultimately extended to over a year, making it the longest of all N. I. Vavilov's expeditions (Goncharov, 2012). A transcript of an evening radio broadcast from Kharkiv, found in the Central Archives of Scientific and Technical Documentation of St. Petersburg, indicates that the collection mission received media coverage. The broadcast stated that its main objectives were to study agricultural production and collect seed samples of cultivated plants, many of which were largely unknown in the Soviet Union, for potential introduction into various regions of the USSR. It also noted that Vavilov was the first Soviet citizen to visit several of the countries on the collection mission route and that he received substantial support from agronomic and botanical institutions (TsGANTD of SPb, F. R-318, Op. 11, D. 114, p. 88). Within the VIR Herbarium, we identified 3,743 specimens associated with the Mediterranean collection mission.

Based on data from herbarium labels, we reconstructed the coordinates and created a map of collection sites for both herbarium and seed accessions along N. I. Vavilov's collection mission route (Fig. 2).

As mentioned above, during the collection mission, Nikolai Vavilov cooperated with French colleagues who not only helped with their knowledge but also provided herbarium and seeds for VIR (Louis Blaringhem, Louis Charles Trabut, Léon Octave Ducellier, and Félicien Boeuf) (Fig. 3).

Louis Blaringhem (1878–1958) was a botanist, agronomist, geneticist, doctor of natural sciences, head of a department at the Pasteur Institute, President of the French Botanical Society and member of the French Academy of Sciences, and author of more than 300 publications. Blaringhem was one of the first French scientists to combine classical genetics and agronomic science in his work (https://cths.fr/an/savant.php?id=111835#). Louis Blaringhem made a practical contribution to the improvement of French agriculture by applying the method of individual selection of pure barley lines from the main barley-growing regions (Bonneuil, Thomas, 2009). Blaringhem provided samples of Rivet wheat and einkorn wheat, as well as their hybrids (herbarium specimens).

Louis Charles Trabut (1853–1929) was a botanist, physician, director of the Algerian Botanical Garden and the Botanical Service of Algeria, and one of the main authors of the multivolume *Flora of Algeria*. He was also the founder of the Algerian Society of Horticulture (Société d'horticulture d'Algérie). The focus of his scientific work was applied botany. He published studies on the cultivation of olive trees, soybean, cotton, cereals, and fruits, including the first description of clementines (https://www.alyasmina.org/archives/battandier-trabut.html). N. I. Vavilov called Trabut a widely educated florist and botanical geographer, an evolutionist, and a great French expert in plant introduction, and pointed out the value of his work on citruses for the subtropical regions of the Soviet Union (Vavilov, 1987). Trabut provided specimens of wheat, goatgrass and oat (original herbarium specimens).

Léon Octave Ducellier (1878–1937) was a botanist, plant breeder, head of an agricultural institute, and director of the Centre for the Study of Cereals at the National Institute of Agriculture in Maison-Carrée. He worked on crop breeding in Algeria, including cereals, flax, and tobacco. He coauthored the *Catalogue of Plants of Morocco* and studied North African wheat while promoting forage crop production in the region (https://data.bnf.fr/fr/documents-by-rdt/12193984/te/page1?type=work). Ducellier provided samples of goatgrass (originals and reproductions), oats, and vetch (reproductions).

Émile Miège (1880–1969) was a plant breeder, agronomist, head of agricultural research in Morocco, director of a genetic station, and founder of the Moroccan Agricultural Society (Société des agriculteurs du Maroc). His work focused on wheat, barley, cotton, flax, maize, rice, sugarcane, drought-tolerant fodder plants, and agronomic practice improvement. He authored over 250 scientific papers, with major contributions on Moroccan durum wheat and barley and Moroccan fodder plants (https://cths.fr/an/savant.php?id=104426). Miège provided specimens of einkorn, goatgrass, barley (originals), and vetch (reproductions).

Félicien Boeuf (1875–1961) was an agronomist, founder and director of the Agronomic Experiment Station, and professor of botany at the Colonial School of Agriculture in Tunis (École coloniale d'agriculture de Tunis). He authored works on plant breeding and Tunisian wheat (https://cths.fr/an/savant.php?id=121373). One of his most significant achievements was establishing the first French chair of genetics and breeding at the Colonial School of Agronomy in Tunisia (Bonneuil, 2006). In 1936, he founded a genetics chair at the National Institute of Agronomy (Institut National Agronomique) in Paris (Bonneuil, Thomas, 2009). Vavilov admired Boeuf's large-scale efforts in Tunisia, particularly his establishment of an agronomic station, which functioned as a full-fledged applied botany institute with substantial staff, laboratories, an advanced meteorological service, and herbarium. Boeuf provided samples of flax and vetch (reproductions).

A significant part of the specimens came from botanical and seed-breeding institutions in France, with one of the most notable contributors being Vilmorin-Andrieux et Cie. Founded in the 18th century, this private seed-breeding firm remains active today (https://www.vilmorinmikado.com/en/vilmorin-mikado). By the early 20th century, it was

[3] an ethno-religious group

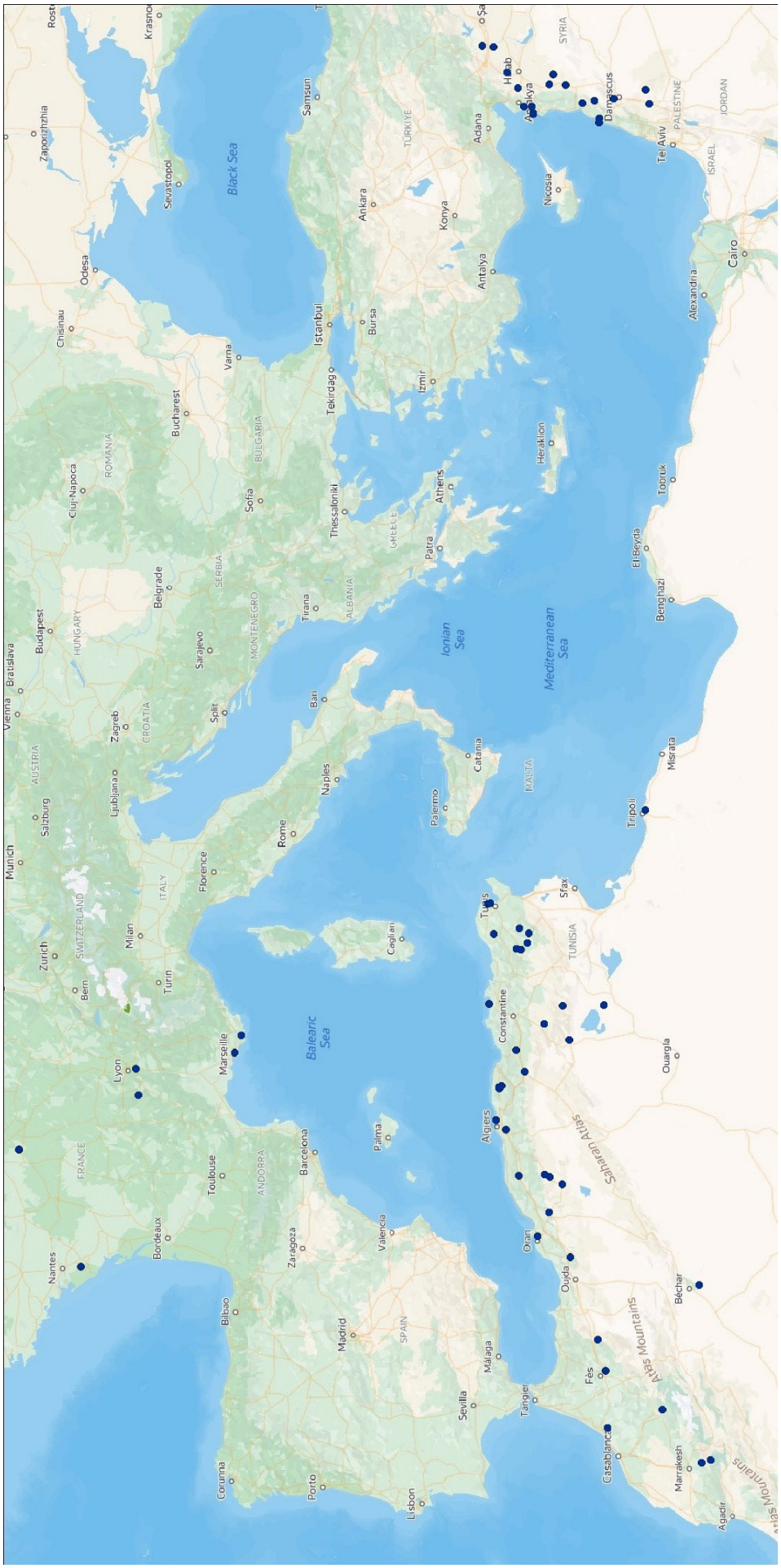

Black Sea
Mediterranean Sea
Ionian Sea
Balearic Sea
Sahara Atlas
Atlas Mountains
Rif Mountains
Istanbul
Ankara
Izmir
Athens
Thessaloniki
Sofia
Bucharest
Odesa
Sevastopol
Samsun
Antalya
Adana
Konya
Cairo
Alexandria
Damascus
Tel Aviv
Nicosia
Heraklion
Tobruk
Benghazi
Misrata
Tripoli
Sfax
Tunis
Constantine
Algiers
Oran
Ouargla
Béchar
Oujda
Fès
Tangier
Casablanca
Marrakesh
Agadir
Madrid
Barcelona
Valencia
Palma
Seville
Málaga
Zaragoza
Bilbao
Lisbon
Porto
Coruña
Nantes
Bordeaux
Toulouse
Marseille
Lyon
Zurich
Bern
Milan
Turin
Munich
Vienna
Bratislava
Budapest
Salzburg
Ljubljana
Zagreb
Belgrade
Sarajevo
Split
Bari
Naples
Rome
Florence
Palermo
Catania
Cagliari
Tirana
Thessaloniki
Patra
Samsun
Tekirdag
Bursa
Varna
Chisinau
Cluj-Napoca
Zaporizhzhia
Krasnodar
Rostov
Samsun
Hatay
Aleppo
Latakia
Damascus
Tel Aviv
Nicosia
Adana
Konya
Ankara
Antalya
Heraklion
Tobruk
Benghazi
Misrata
Tripoli
Sfax
Tunis
Constantine
Algiers
Oran
Ouargla
Béchar
Oujda
Fès
Tangier
Casablanca
Marrakesh
Agadir
Madrid
Barcelona
Valencia
Palma
Seville
Málaga
Zaragoza
Bilbao
Lisbon
Porto
Coruña
Nantes
Bordeaux
Toulouse
Marseille
Lyon
Zurich
Bern
Milan
Turin
Munich
Vienna
Bratislava
Budapest
Salzburg
Ljubljana
Zagreb
Belgrade
Sarajevo
Split
Bari
Naples
Rome
Florence
Palermo
Catania
Cagliari
Tirana
Thessaloniki
Patra
Athens
Sofia
Bucharest
Odesa
Sevastopol
Samsun
Antalya
Adana
Konya
Ankara
Izmir
Bursa
Istanbul
Tekirdag
Varna
Chisinau
Cluj-Napoca
Zaporizhzhia
Krasnodar
Rostov
Samsun
Hatay
Aleppo
Latakia
Damascus
Tel Aviv
Nicosia

Fig. 3. French collectors: (top line, from left to right) Louis Blaringhem, Félicien Boeuf, and Léon Octave Ducellier; (bottom line) Louis Charles Trabut, and Émile Miège

Рис. 3. Французские коллекторы: (вверху, слева направо) Луи Бларингем, Фелисьен Беф, Леон-Октав Дюсселье; (внизу) Луи Шарль Трабю, Эмиль Мьеж

already one of France's largest seed companies, known not only for producing and distributing high-quality agricultural seeds worldwide but also for its contributions to genetics and plant breeding. The company developed France's first hybrid wheat cultivars, such as 'Aurore', 'Prince Albert', 'Blé de Noël', and 'Bon Fermier' (Laurent, 2015).

The private library of Vilmorin-Mikado, the enterprise's modern successor, preserves works by N. I. Vavilov (Vavilov, 1925, 1929; 1951) and other VIR's scientists (Barulina, 1930; Bukasov, 1930; Tchingo-Tchingas, 1931). It also holds multiple volumes of *Proceedings on Applied Botany, Genetics, and Breeding* (Fig. 4), reflecting the firm's longstanding scientific collaboration with VIR.

Ninety specimens were received from Vilmorin-Andrieux et Cie. These are original herbarium specimens (honeysuckle, goatgrass, wheat, and barley) and reproductions (eggplant, broad bean, cowpea, vetch, flax, melon, rice, mountain ash, beet, tobacco, tomato, and peavine).

The VIR Herbarium also holds specimens from other institutions in France and its controlled territories. The botanical gardens of Rouen, Lyon, Toulon, and Bordeaux, the Botanical Station in Brignon, and Maison Denaiffe et Fils seed company provided goatgrass (originals), West Indian gherkin, eggplant, vetch, Indian mallow, flax, oats, rice, foxtail, and groundcherry, which were reproduced in the Transcaucasia, North Caucasus, Central Asian, Sukhumi and Ukrainian Branches of VIR, and experimental fields in Detskoye Selo, and Butyrsky Khutor. Several samples came from the National Institute of Agriculture (Algeria). These are original samples of oats and barley, as well as flax reproduced at the North Caucasus Branch of VIR, and beet reproduced at the Ukrainian Branch of VIR.

The analysis of the origin of specimens showed that about 90% of the collected material represent plant samples delivered by Vavilov's collecting mission (Fig. 5, a). We have found 3,746 specimens attributed to the Mediterranean collection mission in the VIR Herbarium. Due to the difficulty of drying and shipping, it was seldom to collect original herbarium specimens; the collection contains only 246 such specimens, including 191 from the collection mission (Fig. 6). Most herbarium specimens are reproductions, i.e., plants grown afterwards from the collected seeds in the fields of the Institute and other experiment stations. The network of geographically arranged plantings that existed at that time made it possible to cultivate plant accessions under diverse climate conditions to study their agronomic features. The complete list of experimental fields where the plant samples involved in the study were reproduced is presented in Table 1.

There were 54 specimens from French scientists, including 49 specimens from personal collections. Botanical gardens and seed companies provided 242 specimens, of which 11 were originals. For 155 specimens, only the country of origin is indicated (France – 143, Algeria – 12); more detailed information is not specified (see Fig. 5, a). They are pear sam-

Fig. 4. **Volumes of *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding* in the private library of Vilmorin-Andrieux et Cie in La Ménitré** (Feb. 08, 2022, photo by E. Khablova)

Рис. 4. **Тома «Трудов по прикладной ботанике, генетике и селекции» в частной библиотеке фирмы Vilmorin-Andrieux et Cie в Ла-Менитре** (8.02.2022, фото Е. Хабловой)

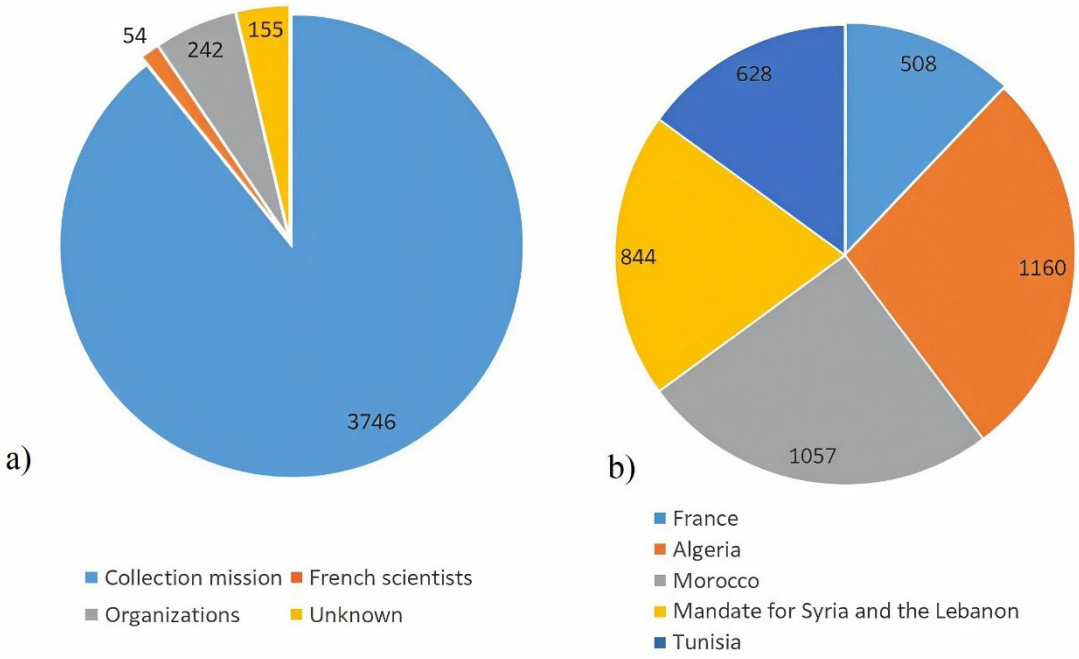


Fig. 5. **Distribution of herbarium specimens according to their sources (a) and countries of origin (b)**

Рис. 5. **Распределение гербарных образцов по источникам поступления (a) и странам происхождения (b)**

Fig. 6. **Herbarium specimen of rye collected by N. I. Vavilov in Syria (WIR-81903)**

Рис. 6. **Гербарный образец ржи, собранный Н. И. Вавиловым в Сирии (WIR-81903)**

ples collected by V. V. Pashkevich at the Volyn Horticultural School; vetch by E. I. Barulina at the Steppe Branch of VIR and in Saguramo; flax by V. S. Muratova at the North Caucasus Branch of VIR; tomatoes by V. I. Matskevich at the Ukrainian and Steppe Branches of VIR; grapes at the Nikita Botanical Garden, etc. The seeds of these samples were collected in the following countries of origin.

The specimens were grouped according to their countries of origin as follows. The largest number of specimens came from Algeria (1160) and Morocco (1057); these were mostly wheat from Vavilov's collection mission. Then, there were 844 specimens from Syria and the Lebanon, and 628 from Tunisia (see Fig. 5, b). The smallest number of specimens came from France (508), which is quite logical, since the collecting mission's route covered only part of southern France, and there were very few samples collected.

Among the herbarium specimens, cereals (wheat, oats, goatgrass, and barley), forages (vetch, peavine, and broad bean), industrial crops (hemp, flax, cotton, and tobacco), vegetables (beet, and tomato), and fruit plants (grapevine, and pear) prevail. Other crops are represented by a few samples. All species and varieties of specimens from France and its subordinate territories stored in the VIR Herbarium are shown in Table 2.

Table 1. **Reproduction sites of the studied specimens in the regions of the Soviet Union**
Таблица 1. **Места репродукции исследуемых образцов в регионах Советского Союза**

Name	Location
Magarach Ampelographic Collection	Yalta, Crimea
Belarusian Branch of VIR	Minsk, Belarus
Bratsevskaya Experiment Station	Moscow
Bykovskaya Melon Experiment Station	Lower Volga Region (now Volgograd Province)
Volyn Horticultural School	Volyn (now Zhytomyr Province) Ukrainian SSR (now Ukraine),
East Transcaucasia Branch of VIR	Mardakan, Azerbaijan,
Detskoye Selo	Leningrad Province
Transcaucasia Research Institute of Cotton	Ganja, Azerbaijan
Institute of Botany of Azerbaijan	Baku, Azerbaijan
Krasny Pakhar Experiment Station”	Leningrad Province
North Caucasus Branch of VIR	North Caucasus (now Krasnodar Territory)
Steppe Branch of VIR	Voronezh Province
Maikop Experiment Station of VIR	Adyghe Autonomous Region (now Republic of Adygea)
Mliiv Horticultural Experiment Station	Cherkasy Province, Ukrainian SSR (now Ukraine)
Nemchinovka Research Institute of Agriculture	Moscow Province
Nikita Botanical Gardens	Yalta, Crimea
Experimental field in Saguramo	Saguramo, Georgia
Sochi Agricultural and Horticultural Experiment Station	Sochi, North Caucasus (now Krasnodar Territory)
Central Asian Research Institute of Cotton	Tashkent Region, Uzbek SSR (now Uzbekistan)
Central Asian Branch of VIR	Tashkent Region, Uzbek SSR (now Uzbekistan)
Sukhumi Branch of VIR	Sukhumi, Abkhaz ASSR (now Abkhazia)
Turkestan Breeding Station	Tashkent Region, Turkestan (now in Uzbekistan)
Ukrainian Branch of VIR	Kharkiv District (now Kharkiv Province, Ukrainian SSR (now Ukraine)
Butyrsky Khutor Educational and Experimental Base	Moscow

Table 2. **List of taxa obtained by the VIR Herbarium from France and its subordinate territories in the 1920s and 1930s**

Таблица 2. **Список таксонов с территории Франции и подконтрольных ей территорий, поступивших в Гербарий ВИР в 20–30-е годы XX века**

Modern scientific name	Crop
Abutilon theophrasti Medik.	Indian mallow
Aegilops biuncialis Vis.	Goatgrass
A. cylindrica Host	– // –
A. kotschyi Boiss.	– // –
A. neglecta Req. ex Bertol.	– // –
A. peregrina (Hack.) Maire & Weiller	– // –
A. speltoides Tausch.	– // –
A. squarrosa Cav.	– // –
A. triticoides Link	– // –
A. triuncialis L.	– // –
A. umbellulata Zhuk.	– // –
A. ventricosa Tausch.	– // –
Allium cepa L.	Onion
A. porrum L.	– // –
A. schoenoprasum L.	– // –
Avena barbata Pott ex Link	Oat
A. byzantina K.Koch	– // –
A. eriantha Durieu	– // –
A. eriantha Durieu	– // –
A. fatua L.	– // –
A. longiglumis Durieu subvar. *pubifolia* Malz.	– // –
A. ludoviciana Dur.	– // –
A. sativa L.	– // –
A. sterilis L.	– // –
A. strigosa Schreb.	– // –
A. ventricosa Balansa	– // –
Beta maritima L.	Beet
B. vulgaris L.	– // –
Brassica capitata DC. ex H. Lév.	Cabbage
B. juncea (L.) Czern.	Brown mustard
B. napus L.	Rapeseed
Cannabis sativa L.	Hemp
Capsicum annuum L.	Pepper
Cerasus vulgaris Mill.	Cherry
Citrullus colocynthis (L.) Schrad.	Watermelon

Modern scientific name	Crop
C. lanatus (Thunb.) Matsum. & Nakai	– // –
Corylus avellana L.	Hazel
Cucumis anguria L.	West Indian gherkin
C. melo L.	Melon
C. sativus L.	Cucumber
Glycine max (L.) Merr.	Soybean
Gossypium barbadense L.	Cotton
G. herbaceum L.	– // –
G. hirsutum L.	– // –
G. jumelianum (Tod.) Prokh.	– // –
Hibiscus esculentus L.	Okra
H. roseus Thore	– // –
Hordeum bulbosum L.	Barley
H. distichon L.	– // –
H. murinum L.	– // –
H. spontaneum K. Koch	– // –
H. vulgare L.	– // –
H. vulgare L.	– // –
Lathyrus annuus L.	Peavine
L. articulatus L.	– // –
L. cicera L.	– // –
L. clymenum L.	– // –
L. gorgoni Parl.	– // –
L. hierosolymitanus Boiss.	– // –
L. sativus L.	– // –
Linum bienne L.	Flax
L. maritimum L.	– // –
L. tenuifolium L.	– // –
L. trigynum L.	– // –
L. usitatissimum L.	– // –
Lonicera acuminata Wall.	Honeysuckle
Lycium chinense Mill.	Wolfberry
Lycopersicum esculentum Mill.	Tomato
Malus domestica (Suckow) Borkh.	Apple
M. floribunda Siebold ex Van Houtte	– // –

Table 2. The end

Таблица 2. Окончание

Modern scientific name	Crop
M. purpurea (A. Barbier) Rehder	– // –
Medicago intertexta (L.) Mill.	Alfalfa
M. sativa L.	– // –
M. turbinata (L.) All.	– // –
Melilotus indicus (L.) All.	Sweetclover
Momordica charantia L.	Bitter melon
Nekemias megalophylla (Diels & Gilg) J. Wen & Z.L. Nie	Peppervine
Nicotiana acuminata (Graham) Hook.	Tobacco
N. alata Link & Otto	– // –
N. glauca Graham	– // –
N. langsdorffii Schrank	– // –
N. paniculata L.	– // –
N. plumbaginifolia Viv.	– // –
N. rustica L.	– // –
Oryza sativa L.	Rice
Papaver somniferum L.	Poppy
Physalis peruviana L.	Groundcherry
Ph. philadelphica Lam.	– // –
Pyrus communis L.	Pear
Raphanus sativus L.	Radish
Secale montanum Guss.	Rye
Sesamum indicum L.	Sesame
Setaria pumila (Poir.) Roem. & Schult.	Foxtail
S. verticillata (L.) P. Beauv.	– // –
Solanum melongena L.	Eggplant
Sorbus aria (L.) Crantz	Mountain ash
Sorghum bicolor (L.) Moench	Sorghum
Triticum aestivum L. subsp. *aestivum* var. *aestivum*	Wheat
T. aestivum L. subsp. *aestivum* var. *ferrugineum* (Alef.) Mansf.	– // –
T. aestivum L. subsp. *hadropyrum* (Flaksb.) Tzvel. var. *erythroleucon* (Körn.) Mansf.	– // –
T. aestivum L. subsp. *hadropyrum* (Flaksb.) Tzvel. var. *graecum* (Körn.) Mansf.	– // –
T. compactum Host var. *icterinum* (Alef.) Körn.	– // –

Modern scientific name	Crop
T. dicoccoides (Körn. ex Asch. & Graebn.) Aarons.	Wild emmer
T. durum Desf. subsp. *durum* var. *affine* Körn.	Wheat
T. durum Desf. subsp. *durum* var. *apulicum* Körn.	– // –
T. durum Desf. subsp. *durum* var. *durum*	– // –
T. durum Desf. subsp. *durum* var. *leucomelan* (Alef.) Körn.	– // –
T. durum Desf. subsp. *durum* var. *leucurum* (Alef.) Körn.	– // –
T. durum Desf. subsp. *durum* var. *melanopus* (Alef.) Körn.	– // –
T. durum Desf. subsp. *durum* var. *murciense* Körn.	– // –
T. durum Desf. subsp. *durum* var. *niloticum* Körn.	– // –
T. durum Desf. subsp. *durum* var. *reichenbachii* Körn.	– // –
T. durum Desf. subsp. *durum* var. *valenciae* Körn.	– // –
T. durum Desf. subsp. *horanica* (Vav.) Vav. var. *horanoleucurum* Vav. et Jakubz.	– // –
T. monococcum L. var. *flavescens* Körn.	– // –
T. monococcum L. var. *monococcum*	– // –
T. monococcum L. var. *vulgare* Körn.	– // –
T. turgidum L.	– // –
Vicia benghalensis L.	Vetch
V. ervilia (L.) Willd.	– // –
V. faba L.	Broad bean
V. fulgens Batt.	Vetch
V. narbonensis L.	– // –
V. pannonica Crantz	– // –
V. sativa L.	– // –
V. villosa Roth	– // –
Vigna unguiculata (L.) Walp. subsp. *sesquipedalis* (L.) Verdc.	Cowpea
V. unguiculata (L.) Walp. subsp. *unguiculata*	– // –
Vitis thunbergii Siebold & Zucc.	Grapevine
V. vinifera L.	– // –
Ziziphus lotus (L.) Lam.	Jujube

References / Литература

Al Yasmina revue botanique. Archives: Jules Aimé Battandier (1848–1922) & Louis Charles Trabut (1853–1929): [website] Available from: https://www.alyasmina.org/archives/battandier-trabut.html [accessed Feb. 05, 2025].

Aleksandrov D.A. Why Soviet scientists ceased to publish abroad: the development of self-sufficiency and isolation of Russian science, 1914–1940. *Studies in the History of Science and Technology*. 1996;(3):3-24. [in Russian] (Александров Д.А. Почему советские ученые перестали печататься за рубежом: становление самодостаточности и изолированности отечественной науки, 1914–1940. *Вопросы истории естествознания и техники*. 1996;(3):3-24).

Barulina E.I. Lentils of the USSR and of other countries: a botanic-agronomical monograph. *Proceedings of Applied Botany, Genetics and Breeding*. 1930; Suppl 33:1-319. [in Russian] (Барулина Е.И. Чечевица СССР и других стран: ботанико-агрономическая монография. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1930; Приложение 33:1-319).

Bibliothèque nationale de France. Data: [website]. Available from: https://data.bnf.fr/fr/documents-by-rdt/12193984/te/page1?type=work [accessed Feb. 05, 2025].

Bonneuil C., Thomas F. Gènes, pouvoirs et profit. Recherche publique et régimes de production des savoirs de Mendel aux OGM. Versailles: Quae-ECLM; 2009. [in French]

Borkovskaya V.A., Voskanyan S.S. Catalogue of the VIR global collection. Issue 45. Herbarium of the All-Union Lenin Order Research Institute of Plant Industry named after N.I. Vavilov. V.V. Nikitin (ed.). Leningrad: VIR; 1969. [in Russian] (Борковская В.А., Восканян С.С. Каталог мировой коллекции ВИР. Выпуск 45. Гербарий Всесоюзного ордена Ленина научно-исследовательского института растениеводства имени Н.И. Вавилова / под ред. В.В. Никитина. Ленинград: ВИР; 1969).

Bukasov S.M. The cultivated plants of Mexico, Guatemala and Colombia. *Proceedings of Applied Botany, Genetics and Breeding.* 1930; Suppl 47:1-50. [in Russian] (Букасов С.М. Культивируемые растения Мексики, Гватемалы и Колумбии. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1930; Приложение 47:1-50).

CTHS. Comité des travaux historiques et scientifiques. Institut rattaché à l'École nationale des chartes. Sociétés savantes. BLARINGHEM Louis Florimond Joseph: [website]. Available from: https://cths.fr/an/savant.php?id=111835# [accessed Feb. 05, 2025].

CTHS. Comité des travaux historiques et scientifiques. Institut rattaché à l'École nationale des chartes. Sociétés savantes. BOEUF Félicien: [website]. Available from: https://cths.fr/an/savant.php?id=121373 [accessed Feb. 05, 2025].

CTHS. Comité des travaux historiques et scientifiques. Institut rattaché à l'École nationale des chartes. Sociétés savantes. MIEGE Émile: [website]. Available from: https://cths.fr/an/savant.php?id=104426 [accessed Feb. 05, 2025].

Fando R.A. Soviet-French scientific relations (1920–1930s) (Sovetsko-frantsuzskiye nauchnye svyazi [1920–1930-ye gody]). Moscow: Janus-K; 2023. [in Russian] (Фандо Р.А. Советско-французские научные связи (1920–1930-е годы). Москва: Янус-К; 2023).

FRMAE 53CPCOM. Ministère des Affaires Étrangères et Europeennes. Direction des archives. Centre des Archives diplomatiques de la Courneuve. Correspondance politique et commerciale (CPC): K-Afrique. Questions générales. 1918–1940. [in French] Available from: https://www.diplomatie.gouv.fr/IMG/pdf/mn_53cpcom_k-afrique-quesgen_cle8c827f.pdf [accessed Feb. 05, 2025].

Goncharov N.P. N.I. Vavilov's expeditions. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2012;16(3):560-577. [in Russian] (Гончаров Н.П. Экспедиции Н.И. Вавилова. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2012;16(3):560-577).

Khablova E.S. Fertile soil: Russian-French scientific cooperation in the field of plant growing during the Interbellum period. Moscow: Janus-K; 2024. [in Russian] (Хаблова Е.С. Благодатная почва. Российско-французское научное сотрудничество в области растениеводства в период Interbellum. Москва: Янус-К; 2024).

Laurent C. L'herbier Vilmorin: Deux siècles de passion pour les plantes comestibles et d'ornement. Paris: Belin; 2015. [in French]

Tchingo-Tchingas K.M. Milling and baking properties of the wheat varieties in the USSR. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding.* 1931; Suppl 34:1-455. [in Russian] (Чинго-Чингас К.М. Мукомольные и хлебопекарные особенности сортов пшениц СССР. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1931; Приложение 34:1-455).

TsGANTD of SPb: Central State Archive of Scientific and Technical Documentation of St. Petersburg (Tsentralny gosudarstvenny arkhiv nauchno-tekhnicheskoy dokumentatsii Sankt-Peterburga). F. R-318. Op. 11. D. 114. [in Russian] (Центральный государственный архив научно-технической документации Санкт-Петербурга (ЦГАНТД СПб). Ф. Р-318. Оп. 11. Д. 114).

Vavilov N.I. Agricultural Afganistan. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding.* 1929; Suppl 33:1-610. [in Russian] (Вавилов Н.И. Земледельческий Афганистан. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1929; Приложение 33:1-610).

Vavilov N.I. Life is short, we must hurry (Zhizn korotka, nado speshit). Moscow: Sovetskaya Rossiya; 1990. [in Russian] (Вавилов Н.И. Жизнь коротка, надо спешить. Москва: Советская Россия; 1990).

Vavilov N.I. Scientific legacy in letters: International correspondence. Vol. 1. Petrograd period. 1921–1927 (Nauchnoye nasledstvo v pismakh: Mezhdunarodnaya perepiska. T. 1. Petrogradskiy period. 1921–1927 gg.). Moscow: Nauka; 1994. [in Russian] (Вавилов Н.И. Научное наследие в письмах: Международная переписка. Т. 1. Петроградский период. 1921–1927 гг. Москва: Наука; 1994).

Vavilov N.I. Scientific legacy. Vol. 10. From the epistolary heritage. 1929–1940 (Nauchnoye nasledstvo. T. 10. Iz epistolyarnogo naslediya. 1929–1940 gg.). Moscow: Nauka; 1987. [in Russian] (Вавилов Н.И. Научное наследство. Т. 10. Из эпистолярного наследия. 1929–1940 гг. Москва: Наука; 1987).

Vavilov N.I. The Department of Applied Botany and Breeding of the State Institute of Experimental Agronomy. In: *Selection and Seed Production in the USSR: A Review of Breeding and Seed Production Activities Organized by 1923*. Moscow; 1924. p.31-46. [in Russian] (Вавилов Н.И. Отдел прикладной ботаники и селекции Государственного института опытной агрономии. В кн.: *Селекция и семеноводство в СССР: обзор результатов деятельности селекции и семеноводства, орг. к 1923 г.* Москва; 1924. С.31-46).

Vavilov N.I. The five continents. Moscow: Mysl; 1987. [in Russian] (Вавилов Н.И. Пять континентов. Москва: Мысль; 1987).

Vavilov N.I. The origin, variation, immunity and breeding of cultivated plants. *Chronica botanica*. 1951;3(1-6):1-334. [in

Russian] (Вавилов Н.И. Происхождение, изменчивость, иммунитет и селекция культурных растений. *Chronica botanica*. 1951;3(1-6):1-334).

Vavilov N.I. The phylogeny of wheat species. Hybridological analysis of *Triticum persicum* Vav. and interspecific hybridization in wheat. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding.* 1925; Suppl 15(1):3-159. [in Russian] (Вавилов Н.И. К филогенезу пшениц. Гибридологический анализ вида *Triticum persicum* Vav. и межвидовая гибридизация у пшениц. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1925; Приложение 15(1):3-159).

Vilmorin-Mikado: [website] Available from: https://www.vilmorinmikado.com/en/vilmorin-mikado [accessed Feb. 05, 2025].

Vishnyakova M.A., Loskutov I.G. Vavilov Gardens in France: roots and crowns. *Vavilovia*. 2018;1(1):40-50. [in Russian] (Вишнякова М.А., Лоскутов И.Г. Вавиловские сады во Франции: корни и крона. *Vavilovia*. 2018;1(1):40–50). DOI: 10.30901/2658-3860-2018-1-40-50

Information about the authors:

Larisa V. Bagmet, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, l.bagmet@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0003-0768-0056

Elizaveta S. Khablova, Researcher, S.I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg Branch, 5 Universitetskaya Emb., St. Petersburg 199034, Russia, samomamo@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-1468-9462

Информация об авторах

Лариса Владимировна Багмет, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, l.bagmet@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0003-0768-0056

Елизавета Сергеевна Хаблова, научный сотрудник, Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова Российской академии наук, Санкт-Петербургский филиал, 199034 Россия, Санкт-Петербург, Университетская набережная, 5, samomamo@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-1468-9462

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 27.03.2025; одобрена после рецензирования 05.08.2025; принята к публикации 03.09.2025.
The article was submitted on 27.03.2025; approved after reviewing on 05.08.2025; accepted for publication on 03.09.2025.

МОБИЛИЗАЦИЯ И СОХРАНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 581.1:581.19:581.1.03:581.4:60:502.1:602.6:58
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-37-56

CC BY

Изучение и создание коллекций *in vitro* редких исчезающих растений семейства Rosaceae

А. С. Земцова[1], Н. А. Алтаева[1], М. М. Аралбаева[1], Н. А. Артимович[1], А. Б. Толеген[1, 2], С. В. Кушнаренко[1], Е. Я. Сатеков[1], Н. В. Премина[3], Н. В. Ромаданова[1]

[1] *Институт биологии и биотехнологии растений, Алматы, Казахстан*

[2] *Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

[3] *Западно-Алтайский государственный природный заповедник, Риддер, Казахстан*

Автор, ответственный за переписку: Алина Сергеевна Земцова, zemtsovaaalina@gmail.com

Актуальность. Актуальность обусловлена необходимостью сохранения генетического разнообразия редких и исчезающих растений семейства Rosaceae, которые играют важную роль в экосистемах и имеют ценность для сельского хозяйства, медицины и декоративного садоводства.
Материалы и методы. Материалом для исследования послужили 9 видов растений семейства Rosaceae, занесенных в Красную книгу Казахстана.
Результаты. В результате экспедиций собрано девять видов растений семейства Rosaceae. Для шести видов оптимизирована методология введения в культуру *in vitro* и микроклонального размножения на основе использования питательной среды Мурасиге и Скуга с добавлением регуляторов роста.
Заключение. Созданная коллекция *in vitro* редких и исчезающих растений семейства Rosaceae является эффективным инструментом для их сохранения и воспроизводства. Эти методы обеспечивают долгосрочное сохранение биоразнообразия и создают возможности для дальнейшего использования генетического материала в научных и прикладных целях.

Ключевые слова: Rosaceae, Красная книга Казахстана, геоботаническое изучение популяций, дескрипторы, коллекция *in vitro*

Благодарности: работа выполнена при поддержке грантового финансирования проекта AP19676010 Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Земцова А.С., Алтаева Н.А., Аралбаева М.М., Артимович Н.А., Толеген А.Б., Кушнаренко С.В., Сатеков Е.Я., Премина Н.В., Ромаданова Н.В. Изучение и создание коллекций *in vitro* редких исчезающих растений семейства Rosaceae. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(3):37-56. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-37-56

© Земцова А.С., Алтаева Н.А., Аралбаева М.М., Артимович Н.А., Толеген А.Б., Кушнаренко С.В., Сатеков Е.Я., Премина Н.В., Ромаданова Н.В., 2025

IMMUNITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-37-56

Studying and setting up *in vitro* collections of rare endangered plants of the Rosaceae family

Alina S. Zemtsova[1], Nazira A. Altayeva[1], Moldir M. Aralbaeva[1], Natalya A. Artimovich[1], Arman B. Tolegen[1,2], Svetlana V. Kushnarenko[1], Yeskendir Ya. Satekov[1], Natalya V. Premina[3], Natalya V. Romadanova[1]

[1] *Institute of Plant Biology and Biotechnology, Almaty, Kazakhstan*

[2] *Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

[3] *West Altai State Nature Reserve, Ridder, Kazakhstan*

Corresponding author: Alina S. Zemtsova, zemtsovaaalina@gmail.com

Background. The relevance is based on the need to preserve the genetic diversity of rare and endangered Rosaceae plants that play an important role in ecosystems and are of value for agriculture, medicine, and ornamental gardening.
Materials and methods. Nine plant species from the Rosaceae family listed in the Red Data Book of Kazakhstan served as the material for this study.
Results. Accessions of 9 Rosaceae species were collected by plant collecting missions. The *in vitro* initiation and micropropagation techniques employing the Murashige and Skoog medium with added growth regulators was optimized for 6 species.
Conclusion. The established *in vitro* collection of rare and endangered plants from the Rosaceae family is an effective tool for their conservation and reproduction. The applied techniques ensure long-term conservation of biodiversity and create opportunities for further use of genetic material for scientific and practical purposes.

Keywords: Rosaceae, Red Data Book, geobotanical population study, descriptors, *in vitro* collection

Acknowledgements: the study was supported from the grant-funded project AP19676010 of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan.
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Zemtsova A.S., Altayeva N.A., Aralbaeva M.M., Artimovich N.A., Tolegen A.B., Kushnarenko S.V., Satekov Ye.Ya., Premina N.V., Romadanova N.V. Studying and setting up *in vitro* collections of rare endangered plants of the Rosaceae family. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(3):37-56. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-37-56

Введение

В свете стремительной утраты биоразнообразия и надвигающейся угрозы исчезновения множества видов растений, забота о сохранении и защите редких и уязвимых представителей флоры привлекает все большее внимание ученых. Эти зеленые сокровища нашей планеты, несущие в себе уникальные генетические коды и неповторимые экосистемные роли, становятся объектом глубоких исследований и настоятельных призывов к действию, приводя к созданию биотехнологий по сохранению и восстановлению деградирующих популяций (Myers et al., 2000; Molkanova et al., 2015; Marchese, 2015).

Семейство Rosaceae насчитывает более 3000 видов, отличающихся по морфологическим и экологическим особенностям, играющих ключевую роль в поддержании биоразнообразия и функционирования экосистем. Однако в данный момент, в связи с различными антропогенными и природными воздействиями, многие виды растений этого семейства находятся под угрозой исчезновения (Mammadov, Abbaszade, 2022; Afifi et al., 2023; Petruzzello, 2024). Казахстан, с его разнообразными природными условиями и уникальной флорой, не является исключением. В Красную книгу Казахстана занесено 13 видов растений семейства Rosaceae: *Cotoneaster karatavicus* Pojark.; *Crataegus ambigua* C.A. Mey. ex A.K. Becker.; *Drymocallis tianschanica* (TH. Wolf) Sojak (в Красной книге – *Potentilla tianschanica* TH. Wolf); *Malus niedzwetzkyana* Dieck ex Koehne; *Malus sieversii* (Ledeb.) M. Roem.); *Prunus armeniaca* L. (= *Armeniaca vulgaris* Lam.); *Prunus tenella* Batsch (= *Amygdalus ledebouriana* Schlecht.); *Prunus ulmifolia* Franch. (= *Louiseania ulmifolia* (Franch.) Pachom.); *Rosa cinnamomea* L. (= *Rosa pavlovii* Chrshan.); *Sibiraea laevigata* (L.) Maxim. (*Sibiraea altaiensis* (Laxm.) Schneid.); *S. tianschanica* Pojark; *Sorbus persica* Hedl.; *Spiraeanthus schrenckianus* (Fisch. & C.A. Mey.) Maxim.) (Red Data Book…, 2014).

Вышеперечисленные растения – это уникальные виды, обладающие лекарственными, декоративными и пищевыми свойствами, являющиеся ценными источниками генофонда. Генетическое разнообразие внутри этих видов позволяет селекционерам разрабатывать новые сорта, устойчивые к болезням и изменяющимся климатическим условиям, что является важным условием для обеспечения глобальной продовольственной безопасности (Romadanova et al., 2023; Petruzzello, 2024).

Сохранение биоразнообразия требует применения многоаспектных стратегий, направленных на преодоление как экологических, так и антропогенных вызовов. Существуют как традиционные, так и нетрадиционные способы сохранения растений *ex situ* (Hogg, 2012; Coelho et al., 2020; Romadanova et al., 2023). К нетрадиционным способам относится в том числе и среднесрочное сохранение в культуре тканей (хладохранение) *in vitro* побегов при низких положительных температурах от 4°C до 12°C (Kovalchuk et al., 2014; Kushnarenko et al., 2020), а также криоконсервация гермоплазмы растений при температуре –196°C (Popov et al., 2006; Kim et al., 2012; Coelho et al., 2020; Kushnarenko et al., 2023).

Незаменимой техникой в настоящее время стало среднесрочное сохранение *in vitro* коллекций растений при низких положительных температурах. Научные исследования в данной области проводятся во многих странах по всему миру (Kumar, Reddy, 2011; Vinoth, Ravindhran, 2013), в том числе и в Казахстане (Romadanova et al., 2023).

В последнее время успешно используются специально созданные криогенные банки, предназначенные для длительного хранения генетического материала при сверхнизких температурах. Это предоставляет возможность неограниченное время сохранять разнообразные ткани и органы растений в жидком азоте, обеспечивая потенциальную регенерацию и использование в полевых условиях (Kim et al., 2012; https://www.fao.org/home/en; Lateur et al., 2022). Криогенные банки растений играют важную роль в сохранении генетического разнообразия флоры, особенно для видов, находящихся под угрозой исчезновения (Reed, 2008; Romadanova, 2023).

Успешные примеры из разных стран демонстрируют эффективность различных стратегий и технологий сохранения растительного материала, которые могут быть адаптированы для применения в различных регионах, включая Казахстан. Для данных способов сохранения генетического материала необходимо наличие асептической *in vitro* коллекции. *Целью данной работы* являлась оптимизация биотехнологии микроклонального размножения гермоплазмы растений семейства Rosaceae, занесенных в Красную книгу Казахстана, а также мониторинг состояния популяций.

Материалы и методы

Объекты исследования и места сбора растительного материала

Для сбора растительного материала были проведены экспедиции в пять областей Казахстана: Алматинскую, Восточно-Казахстанскую, Жамбылскую, Мангистаускую и Туркестанскую. Места сбора растительного материала показаны на рисунке 1. В результате экспедиций за 2023–2024 гг. собрано девять видов (250 образцов): *Cotoneaster karatavicus* – 39, *Crataegus ambigua* – 40, *Malus niedzwetzkyana* – 3, *Malus sieversii* – 55, *Prunus tenella* – 21, *Prunus ulmifolia* – 15, *Sibiraea laevigata* – 31, *Sorbus persica* – 26, *Spiraeanthus schrenckianus* – 20.

Описание популяций

Для оценки состояния популяций семейства Rosaceae использовались дескрипторы, разработанные Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН (https://www.fao.org/4/i1500e/Kazakhstan.pdf), Международным институтом генетических ресурсов растений, Европейской кооперативной программой по генетическим ресурсам растений и авторами статьи (Lateur et al., 2022). В таблице 1 содержится список условных сокращений, применяемых для обозначения дескрипторов и морфологических признаков растений.

Описание в дескрипторах осуществлялось с учетом 35–49 параметров, варьирующихся в зависимости от вида. В природных условиях координаты участков произрастания фиксировали с помощью GPS-навигатора eTREX®H Garmin Montana 750i. Образцы помечали специальной биркой с номером и датой сбора. Места сбора, GPS-координаты и высота произрастания растений семейства Rosaceae указаны в таблице 2.

Для биотехнологических работ выполняли следующее:

1. Сбор плодов. Плоды каждого образца помещали в пластиковые контейнеры объемом 250 мл с крышкой или в полиэтиленовые пакеты.

2. Сбор побегов. Побеги размером 15–30 см срезали секатором и помещали между плотными сложенными

Рис. 1. **Места сбора растений семейства Rosaceae**
Fig. 1. **Rosaceae plant collecting sites**

Таблица 1. **Список условных сокращений**
Table 1. **List of abbreviations for descriptors and morphological characters**

Дескрипторы		Морфологические признаки			
ВПО	Величина плодов образца	АК	Ассиметричная крона	ОГ	Отличная герметизация
ВКП	Вкусовые качества плодов	БП	Без повреждений	ОМ	Очень мелкие
ВО	Высота образца	ВВС	Величина выше средней	ПК	Пильчатый край
ГВ	Глубина воронки	ВНС	Величина ниже средней	ПБО	Пластинка без опушения
ИЦЯ	Интенсивность цвета ядра	ВБ	Взрослое больное	ПСО	Пластинка слабо опушенная
КЛ	Край листа	ВЖ	Взрослый жизнеспособный	ПОО	Плодоношение у образца отсутствует
ООП	Основная окраска плодов	ВП	Взрослый плодоносящий	ПОФ	Плоскоокруглая форма плодов
ОСШ	Открывание скорлупы по шву	В	Высокий (-ая)	ПВК	Плохие вкусовые качества
ПЛС	Пластинка листа снизу	Г	Густая	ПШФ	Полушаровидная форма
П	Плодоношение	ГВ	Глубокая воронка	ПКО	Пониклая крона образца
ПКО	Плотность кроны образца	Ж	Желтый	ПЭ	Продолговато-эллиптическая

Таблица 1. Окончание

Table 1. The end

Дескрипторы		Морфологические признаки			
ПО	Плотность образца	ЖК	Желто-красный	РП	Редкая плотность
ПП	Плотность популяции	З	Зеленый (-ая)	Р	Розовый
ПС	Прочность скорлупы	ЗЖ	Зеленовато-желтый	РЗ	Розовато-зеленый цвет
СО	Состояние образца	ЗК	Зубчатый край	РК	Розовато-красный
ФВО	Фактура внешней оболочки плодов	КФП	Коническая форма плодов	СЦ	Светлый цвет
ФКО	Форма кроны образца	КЦ	Красный	СЖ	Светло-желтый
ФЛ	Форма листа	КБ	Красно-бурый	СП	Слабое плодоношение
ФП	Форма плодов	КЗ	Красно-зеленый	СОП	Сильноопушенная пластинка
ЦКП	Цвет кожуры плодов	КГК	Крупногородчатый край	СПЛ	Слабоопушенная пластинка листа
ЦМП	Цвет мякоти плодов	КК	Крупнопильчатый край	С)	Средний (-яя; -ее; -ие)
ЦК	Целостность кожуры	К	Крупные	СПО	Среднепористая оболочка
ШВ	Ширина воронки	ЛВ	Легко вскрываемая скорлупа	СД	Старое дряхлое
		МПО	Малопористая оболочка	ТВ	Тяжело вскрываемая
		М	Мелкая (-ие)	ТК	Темно-красный
		МГК	Мелкогородчатый край	УФ	Удлиненная форма
		МПК	Мелкопильчатый край пластинки	УЯФ	Удлиненно-яйцевидная форма
		МНП	Молодой неплодоносящий	У	Узкая
		МП	Молодой плодоносящий	ХВК	Хорошие вкусовые качества
		МКО	Метловидная крона образца	ЦФ	Цилиндрическая форма
		Н	Низкая (-ое)	ШК	Шаровидная крона
		НКО	Неправильная крона образца	Ш	Широкая
		ОП	Обильное плодоношение	ШПК	Широкопирамидальная крона
		ОБП	Оболочка без пор	ШРФ	Широкораскидистая форма
		ОПК	Обратнопирамидальная крона	ШЦФ	Широкоцилиндрическая форма
		ОЯФ	Обратнояйцевидная форма	ШФ	Широкояйцевидная форма
		ОФ	Округлая форма	ЭФ	Эллиптическая форма
		ОК	Округло-коническая	ЯФ	Яйцевидная форма
		ОЭ	Округло-эллиптическая	ЯК	Ярко-красный
		ОС	Открытая скорлупа		

Таблица 2. **Места сбора, GPS-координаты и высота произрастания растений семейства Rosaceae**
Table 2. **Rosaceae plant collecting sites, their GPS coordinates and altitudes**

Образец	Количество образцов	GPS-координаты, высота над уровнем моря, м	Место сбора, год
Cotoneaster karatavcus	21	N42°36’.064’’ – N42°40’.044’’ E070°13’.444’’ – E070°23’.508’’, 837-844	П1 – Туркестанская область, Сайрам-Угамский национальный парк, ущ. «Кокбулак», 2024
	9	N42°36’.123’’ – N42°36’.574’’ E070°23’.671’’ – E070°24’.047’’, 932-956	П2 – Туркестанская область, Тюлькубасский район, Водохранилище «Кулан», 2024
	9	N43°05’.101’’ – N43°05’.146’’ E069°55’.351’’ – E069°55’.388’’, 715-716	П3 – Туркестанская область, ущ. Байжансай, река Улкен Букен, 2024
Crataegus ambigua	10	N44°27’.42,2’’ – N44°27’.45,8’’ E50°35’. 22,2’’ – E50°35’. 25,1’’, 51-126	Популяция 1 (П1) – Мангистауская область, урочище «Кизим», 2023
	10	N44°28’.26,3’’ – N44°28’.27,5’’ E51°00’. 45,4’’ – E51°00’. 50,1’,’ 58-81	П2 – Мангистауская область, ущ. «Сұлтан Үлы», 2023
	10	N43°39’.02,7’’ – N43°39’.55,8’’ E50°35’. 22,2’’ – E50°35’. 25,1’’, 4-12	П3 – Мангистауская область, Мангышлакский экспериментальный ботанический сад, 2023
	10	N44°12’.53,8’’ – N44°12’.55,5’’ E51°59’. 29,1’’ – E51°59’. 30,8’’, 252-277	П4 – Мангистауская область, Западный Каратау, ущ. «Самал», 2023
Malus niedzwetzkyana	2	N43°17’.896’’ – N43°17’.880’’ E079°30’.902’’ – E079°30’.912’’, 1646-1664	П1 – Алматинская область, Уйгурский район, ущ. «Большой Кыргызсай», 2024
	1	N43°,40’.1080’’, E076,59’.8702’’, 600	П2 – Алматинская область, Илийский район, 2024
Malus sieversii	35	N43°17’.118’’ – N43°23’.036’’ E77°34’.394’’ – E77°39’.850’’, 819-1343	П1 – Енбекшиказахский район, Алматинская область, село Тургень, 2023
	19	N43°17’.938’’– N43°20’.749’’ E079°29’.802’’– E079°37’.927’’, 1585-1657	П2 – Алматинская область, Уйгурский район, ущ. «Кыргызсай», 2023-2024
	1	N43°38’.240’’, E080°03’.255’’, 745	П3 – Алматинская область, Уйгурский район, трасса Чунджа-Кольжат, 2024
Prunus tenella	20	N49°42’.460’’ – N49°42’.466’’ E083°43’.463’’ – E083°43’.492’’, 710-710	П1 – Восточно-Казахстанская область, западный Алтай, окрестность п. Прибрежный, 2023
	1	N50°32’.305’’, E083°54’.190’’, 512	П2 – Восточно-Казахстанская область, окраина г. Риддер, 2024

Таблица 2. Окончание
Table 2. The end

Образец	Количество образцов	GPS-координаты, высота над уровнем моря, м	Место сбора, год
Prunus ulmifolia	15	N43°13’29.106’’, E76°54’51.132’’, 867-880	Алматинская область, Главный Ботанический сад, 2023-2024
Sibiraea laevigata	10	N50°19’.254’’ – N50°19’.290’’ E83°32’.514’’ – E083°33’.083’’, 730-793	П1 – Восточно-Казахстанская область, г. Риддер, долина реки Быструха, 2023
	21	N50°17’.826’’ – N50°17’.855’’ E083°29’.310’’ – E083°29’.379’’, 873-880	П2 – Восточно Казахстанская область, г. Риддер, пойма реки Громотуха, 2024
Sorbus persica	21	N42°24’.423’’ – N42°53’.915’’ E70°34’.813’’ – E70°34’.874’’,1752-1883	П1 – Туркестанская область, Аксу-Жабаглинский государственный природный заповедник (АЖГПЗ), ущ. «Кши-Каинды», 2023
	5	N42°53’.910’’ – N42°53’.915’’ E70°00’.086’’ – E70°00’.091’’, 1044-1052	П2 – Туркестанская область, АЖГПЗ, ущ. «Ауле Карабастау», 2023 г.
Spiraeanthus schrenckianus	12	N42°44’35.33’’ – N42°44’39.81’’ E71°00’01.53’’ – E71°00’20.97’’, 1055-1079	П1 – Жамбылская область, Жуалынский район, перевал Куюк, 2023
	8	N42°58’.608’’ – N42°58’.623’’ E69°40’.705’’ – E69°40’.707’’, 527-538	П2 – Туркестанская область, АЖГПЗ, предгорье Каратау, пещера Ак-Мечеть, 2023

картонными листами размером 42 × 59,4 см для изготовления гербария.

3. Сбор черенков. Черенки со спящими почками размером 25–40 см срезали секатором в начале марта. Черенки использовали для проращивания в лабораторных условиях (ЛУ).

Введение в культуру in vitro

В ЛУ семена всех образцов очищали от мякоти, просушивали и стерилизовали в (1 : 1) коммерческом отбеливателе «Белизна» (5–15% гипохлорита натрия, щелочные компоненты ≤ 5%, вода) в течение 5 минут.

Опыт 1 (О1) – семена стратифицировали в пластиковых контейнерах объемом 300 мл, заполненных перлитом (Union Perlite, Алматы, Казахстан; https://perlite.kz) при 4°С (8 недель), освещенность – 10 μmol m^{-2} s^{-1}, 8-часовой фотопериод (акклиматизация в холодных условиях, АХ).

Через 8 недель контейнеры переносили в светокультуральную комнату, температура – 24 ± 1°С, освещенность – 40 μmol m^{-2} s^{-1}, фотопериод – 16 ч (стандартные условия, СУ); отросшие в результате побеги (1–2 см) стерилизовали в 0,1% $HgCl_2$ в течение 4–9 мин, промывали стерильной водой и помещали в пробирки (150 × 25 мм) (PhytoTechnology Laboratories, Lenexa, KS, USA) со средой Мурасиге и Скуга (МС) (Murashige, Skoog, 1962): 30 г/л сахарозы, 0,5 мг/л 6-бензиламинопурина (БАП), 0,02 мг/л индолилмасляной кислоты (ИМК), 1,75 г/л джелрайта, 4 г/л агара, pH 5,7.

Семена стратифицировали (8 недель) в пластиковых контейнерах объемом 300 мл в условиях АХ, после чего их или изолированные из них зародышевые оси стерилизовали в 0,1% $HgCl_2$ в течение 5 мин и использовали для: Опыт 2/1 (О2/1) – семена проращивали в пробирках в СУ на среде Кнопа (Knop, 1865): 1 г/л $Ca(NO_3)_2$, 0,25 г/л $MgSO_4$*$7H_2O$, 0,25 г/л KH_2PO_4, 0,125 г/л KCI, 27,8 мг/л $FeSO_4$*$7H_2O$, 37,3 мг/л Na_2EDTA*$2H_2O$, 1,75 г/л джелрайта, 4 г/л агара, pH 5,7; Опыт 2/2 (О2/2) – зародышевые оси проращивали в пробирках в СУ на среде Кнопа; Опыт 2/3 (О2/3) – семена проращивали в пробирках в СУ на среде МС; Опыт 2/4 (О2/4) – зародышевые оси проращивали в пробирках в СУ на среде МС. Контролем служили: семена, пророщенные в перлите без стратификации (К1); семена, пророщенные в пробирках в СУ на среде Кнопа без стратификации (К2); семена, пророщенные в пробирках в СУ на среде МС без стратификации (К3).

В культуру *in vitro* вводили также побеги *Prunus ulmifolia* и *Malus sieversii*, полученные путем проращивания однолетних черенков в ЛУ в период с февраля по март, и побеги, проросшие в естественных условиях в апреле – мае. Черенки со спящими почками размером 30–40 см обрабатывали мыльным раствором под проточной водой, после чего проводили поверхностную стерилизацию раствором (1 : 1) отбеливателя «Белизна» в течение 5 мин. Основания черенков погружали в емкость с водой на глубину 15 см, ежедневно меняли срез и обновляли воду (Romadanova et al., 2016). Побеги, полученные из проросших в перлите семян (2–3 см), из проросших спящих почек (1–2 см), проросшие в естественной среде (размером 2–3 см), промывали в мыльном растворе, после чего обрабатывали 0,1% $HgCl_2$ в стерильных условиях в течение 5 мин для побегов, проросших спящих почек и 7 мин для побегов, полученных из проросших семян и проросших в естественной среде. Обработанные побеги помещали в пробирки со средой МС, описанной выше (Romadanova et al., 2016).

Микроклональное размножение

Для получения высокого коэффициента размножения (КР) использовали среду МС с различными концентрациями фитогормонов в зависимости от генотипа (табл. 3). КР асептических побегов после 4 недель культивирования рассчитывали по формуле: P = a/вс, где «а» – количество образовавшихся побегов, «в» – количество высаженных побегов, «с» – количество культивирований.

Скрининг эндофитной контаминации

Полученные *in vitro* побеги тестировали на наличие эндофитной микрофлоры на специализированной среде 523: 10 г/л сахарозы, 8 г/л гидролизата казеина, 4 г/л дрожжевого экстракта, 2 г/л KH_2PO_4, 0,15 г/л $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, 6 г/л джелрайта, pH 6,9 (Viss et al., 1991), асептические побеги переносили в культуральные сосуды (237 мл) (PhytoTechnology Laboratories, Lenexa, KS, USA).

Статистический анализ

В экспериментах по введению в культуру *in vitro* использовали по 14–56 побегов для проведения эксперимента в трехкратной повторности. Общее количество побегов, индексированных с использованием бактериальной питательной среды 523, варьировалось от 14 до 86, в зависимости от доступности образцов, полученных в каждом образце после инициации. Средние значения и стандартная ошибка (SE) рассчитывали по повторности экспериментов и проанализировали с помощью дисперсионного анализа. Тесты разделения средних значений выполнены с использованием теста Тьюки, при P ≤ 0,05 значения считались существенно различными. Все анализы выполнялись с использованием пакета программного обеспечения SYSTAT 13.0 (https://systat.informer.com/13.0).

Результаты и обсуждение

Описание популяций

Распределение качественных морфологических признаков в популяциях представлены (табл. 4). Общий вид растений, плоды и гербарий показаны (рис. 2).

Cotoneaster karatavicus. Основные виды растительности в районе сбора популяций – это *Acer platanoides* L., *Crataegus laevigata* (Poir.) DC., *Fraxinus excelsior* L., *Rosa spinosissima* L. Поражаемость деревьев не превышает 5–10% (некроз).

Crataegus ambigua. Доминантные виды растений в месте произрастания: *Caragana grandiflora* (M. Bieb.) DC., *Elaeagnus angustifolia* L., *Morus alba* L., *Rhamnus sintenisii* Rech. f. Отмечен некроз и *Aphis pomi* De Geer 35–70%.

Malus niedzwetzkyana. В месте сбора популяций отмечены: *Berberis heteropoda* Schrenk, *Prunus armeniaca*, *Ulmus pumila* L.

Яблони поражены (20–65,7%) различными вредителями: *Cydia pomonella* (Linnaeus), *Hyphantria cunea* Drury., *Tetranychidae* Donnadieu и бактериальным ожогом (*Erwinia amylovora* (Burrill) Winslow et al.).

Malus sieversii. Доминантные виды растений в месте сборов: *Berberis heteropoda*, *Elaeagnus angustifolia*, *Lonicera tatarica* L., *Prunus armeniaca* и другие. Поражаемость деревьев – 30,1%, в основном это *Venturia pirina*, *Plasmopara viticola* и другие грибково-ржавчинные заболевания.

Prunus tenella. В месте сбора популяций отмечено произрастание *Lonicera tatarica*, *Rosa spinosissima, Spiraea hypericifolia* L., *Stipa capillata* L. Вредители и болезни не выявлены (< 5%).

Таблица 3. **Варианты питательных сред для микроклонального размножения побегов *in vitro* растений семейства Rosaceae**

Table 3. **Variants of nutrient media for Rosaceae plant shoot micropropagation**

Название вида	Варианты питательных сред
Crataegus ambigua	1) МС с добавлением 30 г/л сахарозы, 0,5 мг/л БАП, 0,01 мг/л ИМК, pH 5,7; 2) МС с 30 г/л сахарозы, 0,2 мг/л БАП, 0,01 мг/л ИМК, pH 5,7; 3) МС с 30 г/л сахарозы, 0,5 мг/л БАП, 0,1 мг/л ИМК, pH 5,7; 4) МС с 30 г/л сахарозы, 0,5 мг/л БАП, 0,02 мг/л ИМК, pH 5,7; 5) МС с 30 г/л сахарозы, 0,5 мг/л БАП, 0,03 мг/л ИМК, pH 5,7
Prunus tenella	1) МС с 30 г/л сахарозы, 0,5 мг/л БАП, 0,01 мг/л ИМК, 7,0 мг/л $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, 9,3 мг/л $Na_2EDTA\ 2H_2O$, 166 мг/л $CaCl_2$, pH 5,7; 2) ½ МС с 30 г/л сахарозы, 0,5 мг/л БАП, 0,01 мг/л ИМК, 7,0 мг/л $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, 9,3 мг/л $Na_2EDTA\ 2H_2O$, 166 мг/л $CaCl_2$, pH 5,7; 3) ½ МС с 20 г/л сахарозы, 0,5 мг/л БАП, 0,01 мг/л ИМК, 7,0 мг/л $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, 9,3 мг/л $Na_2EDTA\ 2H_2O$, 166 мг/л $CaCl_2$, pH 5,7; 4) ½ МС с 20 г/л сахарозы, 1,0 мг/л БАП, 0,01 мг/л ИМК, 7,0 мг/л $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, 9,3 мг/л $Na_2EDTA\ 2H_2O$, 166 мг/л $CaCl_2$, pH 5,7; 5) ½ МС с 20 г/л сахарозы, 1,0 мг/л БАП, 0,05 мг/л ИМК, 7,0 мг/л $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, 9,3 мг/л $Na_2EDTA\ 2H_2O$, 166 мг/л $CaCl_2$, pH 5,7
Prunus ulmifolia	1) МС с 30 г/л сахарозы, 1 мл/л БАП, pH – 5,7; 2) МС с 30 г/л сахарозы, 0,5 мл/л БАП, pH 5,7; 3) МС с 30 г/л сахарозы, 0,5 мл/л БАП, 0,01 мг/л ИМК, pH 5,7; 4) МС с 30 г/л сахарозы, 0,5 мл/л БАП, 0,05 мг/л ИМК, pH 5,7; 5) МС с 30 г/л сахарозы, 0,5 мл/л БАП, 0,02 мг/л ГК, pH 5,7
Sibiraea laevigata	1) МС с 30 г/л сахарозы, 0,5 мг/л БАП, 0,01 мг/л ИМК, pH – 5,7; 2) МС с 30 г/л сахарозы, 0,5 мг/л БАП, 0,01 мг/л ИМК, 0,1 мл/л ГК, pH 5,7; 3) МС с 30 г/л сахарозы, 1 мг/л БАП, 0,01 мг/л ИМК, 0,1 мл/л ГК, pH 5,7; 4) МС с 30 г/л сахарозы, 1 мг/л БАП, 0,01 мг/л ИМК, 0,2 мл/л ГК, pH 5,7; 5) МС с 30 г/л сахарозы, 1 мг/л БАП, 0,01 мг/л ИМК, 0,3 мл/л ГК, pH 5,7
Spiraeanthus schrenckianus	1) МС с 30 г/л сахарозы, 0,5 мг/л БАП, 0,01 мг/л ИМК, pH 5,7; 2) МС с 30 г/л сахарозы, 1,0 мг/л БАП, 0,01 мг/л ИМК, pH 5,7; 3) МС с 30 г/л сахарозы, 0,5 мг/л БАП, 0,1 мг/л ИМК, pH 5,7; 4) МС с 30 г/л сахарозы, 1,0 мг/л БАП, 0,1 мг/л ИМК, pH 5,7; 5) МС с 30 г/л сахарозы, 0,5 мг/л БАП, 0,01 мг/л ИМК, 0,1 мг/л ГК, pH 5,7; 6) МС с 30 г/л сахарозы, 0,2 мг/л БАП, 0,02 мг/л ИМК, pH 5,7; 7) МС с 30 г/л сахарозы, 0,1 мг/л БАП, 0,01 мг/л ИМК, pH 5,7

Таблица 4. **Распределение качественных морфологических признаков у дикорастущих видов растений семейства Rosaceae**

Table 4. **Distribution of qualitative morphological characters in Rosaceae wild plant species**

Название / Дескрипторы		Кол-во	Количество образцов, %				
П1 *Cotoneaster karatavicus*	СО	9	ВЖ (7/77,8)	МП (2/22,2)			
	ФО	9	ОФ (7/77,8)	ПШФ (2/22,2)			
	ПО	9	Г (2/22,2)	С (6/66,7)	РП (1/11,1)		
	П	9	СП (7/77,8)	С (1/11,1)	ОП (1/11,1)		
	ФЛ	9	ЯФ (8/88,9)	УЯФ (1/11,1)			
	ФП	9	ЦФ (4/44,4)	ОК (5/55,6)			
	ЦКП	9	КЦ (2/22,2)	КЗ (3/33,4)	РК (2/22,2)	КБ (2/22,2)	
	ЦК	9	С (8/88,9)	БП (1/11,1)			

Таблица 4. Продолжение
Table 4. Continued

Название / Дескрипторы		Кол-во	Количество образцов, %				
П2 *Cotoneaster karatavicus*	ПП	21	Н (5/23,8)	С (16/76,2)			
	СО	21	ВЖ (8/38,1)	МП (4/19,1)	МНП (9/42,9)		
	ФО	21	ОФ (12/57,2)	ПШФ (9/42,9)			
	ПО	21	РП (10/47,6)	С (11/52,4)			
	ФЛ	21	ЯФ (20/95,2)	УЯФ (1/4,8)			
	П	8	ПОО (13/61,9)	СП (2/9,6)	С (4/19,1)	ОП (2/9,5)	
	ФП	8	ЦФ (3/37,5)	ЯФ (2/25,0)	ОКФ (3/37,5)		
	ЦКП	8	КЗ (3/37,5)	РЗ (3/37,5)	ЗЦ (1/12,5)	РЦ (1/12,5)	
	ЦК	8	С (4/50,0)	БП (4/50,0)			
П3 *Cotoneaster karatavicus*	ПП	9	Н (1/11,1)	С (8/88,9)			
	СО	9	ВЖ (4/44,4)	МП (5/55,6)			
	ФО	9	ОФ (5/55,6)	ПШФ (4/44,4)			
	ПО	9	С (8/88,9)	РП (1/11,1)			
	П	9	СП (2/22,2)	С (2/22,2)	ОП (5/55,6)		
	ФЛ	9	ЯФ (7/77,8)	УЯФ (3/22,2)			
	ФП	9	ЦФ (2/22,2)	ОК (7/77,8)			
	ЦКП	9	КЦ (3/33,3)	КЗ (3/33,3)	РЦ (3/33,4)		
	ЦК	9	С (1/11,1)	БП (8/88,9)			
П1 *Crataegus ambigua*	ПП	10	Н (9/90,0)	С (1/10,0)			
	ВО	10	Н (5/50,0)	С (5/50,0)			
	ФКО	10	ШК (1/10,0)	АК (9/90,0)			
	ПКО	10	С (9/90,0)	РП (1/10,0)			
	П	10	СП (4/40,0)	С (6/60,0)			
	ВПО	10	М (3/30,0)	С (7/70,0)			
	ВКП	10	ПВК (1/10,0)	ХВК (9/90,0)			
П2 *Crataegus ambigua*	СО	10	ВЖ (4/40,0)	МП (6/60,0)			
	ПКО	10	С (5/50,0)	РП (5/50,0)			
	П	10	СП (3/30,0)	С (6/60,0)	ОП (1/10,0)		
П3 *Crataegus ambigua*	СО	10	ВЖ (3/30,0)	МП (7/70,0)			
	ФКО	10	ШК (3/30,0)	АК (7/70,0)			
	ПКО	10	С (9/90,0)	РП (1/10,0)			
	П	10	СП (1/10,0)	С (7/70,0)	ОП (2/20,0)		
П4 *Crataegus ambigua*	СО	10	ВЖ (9/90,0)	МП (1/10,0)			
	ПКО	10	С (6/60,0)	РП (4/40,0)			
	П	10	СП (5/50,0)	С (4/40,0)	ОП (1/10,0)		
	ВКП	10	С (3/30,0)	ХВК (7/70,0)			

Таблица 4. Продолжение
Table 4. Continued

Название / Дескрипторы		Кол-во	Количество образцов, %				
П1 *Malus niedzwetzkyan*	ФКО	2	ПКО (1/50,0)	НКО (1/50,0)			
	ПКО	2	Г (1/50,0)	С (1/50,0)			
	ФЛ	2	УФ (1/50,0)	ЯФ (1/50,0)			
	ПЛС	2	ПБО (1/50,0)	ПСО (1/50,0)			
	КЛ	2	МК (1/50,0)	МПК (1/50,0)			
	ФП	2	ОФ (1/50,0)	КФП (1/50,0)			
	ЦКП	2	Р (1/50,0)	КБ (1/50,0)			
	ШВ	2	У (1/50,0)	С (1/50,0)			
П1 *Malus sieversii*	ПП	35	Н (14/40,0)	С (19/54,3)	В (2/5,7)		
	СО	35	СД (4/11,4)	МНП (3/8,6)	ВЖ (20/57,1)	МП (5/14,3)	ВБ (3/8,6)
	ВО	35	Н (5/14,3)	С (16/45,7)	В (14/40,0)		
	ФКО	35	ШПК (3/8,6)	М (8/22,9)	ОФ (18/51,4)	НКО (6/17,1)	
	ПКО	35	Г (9/25,7)	С (19/54,3)	РП (7/20,0)		
	П	35	ПОО (2/5,7)	СП (24/68,6)	С (5/14,3)	ОП (4/11,4)	
	ФЛ	35	ЭФ (4/11,4)	УФ (2/5,7)	ЯФ (20/57,1)	ШФ (9/25,7)	
	ПЛС	35	СПЛ (17/48,6)	СОП (18/51,4)			
	КЛ	35	МГК (1/2,9)	МПК (13/37,1)	КК (21/60,0)		
	ФП	33	ОФ (27/81,9)	ПОФ (1/3,0)	ОК (5/15,1)		
	ВПО	33	М (14/42,5)	ВНС (8/24,2)	С (8/24,2)	ВВС (3/9,1)	
	ВКП	33	ПВК (26/78,8)	С (7/21,2)			
	ЦМП	33	З (30/90,9%)	Ж (3/9,1)			
	ООП	33	З (21/63,6)	ЗЖ (8/24,2)	СЖ (2/6,1)	ЖК (2/6,1)	
	ЦК	33	С (29/87,9)	БП (4/12,1)			
	ГВ	33	М (12/36,4)	С (16/48,5)	ГВ (5/15,1)		
	ШВ	33	У (9/27,3)	С (23/69,7)	Ш (1/3,0)		
П2 *Malus sieversii*	ПП	19	Н (9/47,4)	С (6/31,6)	В (4/21,0)		
	СО	19	ВЖ (8/42,1)	МП (2/10,5)	ВБ (9/47,4)		
	ВО	19	Н (1/5,3)	С (5/26,3)	В (13/68,4)		
	ФКО	19	ШПК (7/36,8)	ОФ (10/52,6)	ПКО (1/5,3)	НКО (1/5,3)	
	ПКО	19	Г (10/52,6)	С (9/47,4)			
	П	19	СП (7/36,8)	С (6/31,6)	ОП (6/31,6)		
	Л	19	ЯФ (6/31,6%)	УЯФ (7/36,8%)	ОЯФ (2/10,5)	ЭФ (4/21,1)	
	ПЛС	19	ПБО (1/5,3)	СПЛ (10/52,6)	СОП (8/42,1)		
	КЛ	19	КК (6/31,6)	МПК (7/36,8)	ПК (2/10,5)	МК (4/21,1)	
	ФП	19	ОФ (9/47,4)	ПОФ (1/5,3)	ШЦФ (1/5,3)	КФП (8/42,1)	
	ВПО	19	М (1/5,3)	ВНС (5/26,3)	С (10/52,6)	ВВС (2/10,5)	К (1/5,3)

Таблица 4. Продолжение
Table 4. Continued

Название / Дескрипторы		Кол-во	Количество образцов, %				
П2 *Malus sieversii*	ВКП	19	ПВК (10/52,6)	С (8/42,1)	ХВК (1/5,3)		
	ООП	19	З (10/52,6)	ЗЖ (9/47,4)			
	ЦК	19	С (15/78,9)	БП (4/21,1)			
	ГВ	19	М (5/26,3)	С (11/57,9)	ГВ (3/15,8)		
	ШВ	19	У (3/15,8)	С (13/68,4)	Ш (3/15,8)		
П1 *Prunus tenella*	СО	20	ВЖ (7/35,0)	ВП (7/35,0)	МП (3/15,0)	МНП (3/15,0)	
	ВО	20	Н (6/30,0)	С (7/35,0)	В (7/35,0)		
	ПКО	20	Г (2/10,0)	С (10/50,0)	РП (8/40,0)		
	П	20	ПОО (2/10,0)	СП (18/90,0)			
	ВПО	18	ОМ (1/5,6)	М (2/11,1)	С (15/83,3)		
	ФВО	18	ОБП (2/11,1)	МПО (13/72,2)	СПО (3/16,7)		
	ОСШ	18	ОГ (13/72,2)	ОС (5/27,8)			
	ПС	18	ТВ (14/77,8)	ЛВ (4/22,2)			
	ИЦЯ	18	СЦ (12/66,7)	С (6/33,3)			
П1 *Prunus ulmifolia*	СО	15	ВЖ (8/53,3)	МП (7/46,7)			
	П	15	ПОО (7/46,7)	СП (8/53,3)			
	ВО	15	Н (4/26,7)	С (11/73,3)			
	ФКО	15	ШПК (7/46,7)	ОПК (8/53,3)			
	ПКО	15	Г (9/60,0)	С (6/40,0)			
	ФЛ	15	ЭФ (4/26,7)	УФ (4/26,7)	ШФ (7/46,7)		
	ФП	15	ОФ (7/46,7)	ШЦФ (8/53,3)			
П1 *Sibiraea laevigata*	ЦКП	7	ЯК (4/57,1)	ТК (3/42,9)			
	ПП	10	Н (2/20,0)	С (4/40,0)	В (2/20,0)		
	СО	10	ВБ (1/10,0)	ВЖ (5/50,0)	МП (4/40,0)		
	ВО	10	Н (4/40,0)	В (6/60,0)			
	ПКО	10	Г (4/40,0)	С (5/50,0)	РП (1/10,0)		
	П	10	СП (7/70,0)	С (2/20,0)	ОП (1/10,0)		
	ЦК	10	С (4/40,0)	БП (6/60,0)			
	СО	21	ВЖ (19/90,5)	МП (2/9,5)			
П2 *Sibiraea laevigata*	ВО	21	С (5/23,8)	В (16/76,2)			
	ФКО	21	ОФ (9/42,9)	МКО (9/42,9)	НКО (3/14,3)		
	ПКО	21	Г (19/90,5)	С (2/9,5)			
	П	21	С (4/19,0)	ОП (17/81,0)			

Таблица 4. Окончание

Table 4. The end

Название / Дескрипторы		Кол-во	Количество образцов, %				
П1 *Sorbus persica*	ПП	21	Н (7/33,3)	С (1/4,8)	В (13/61,9)		
	СО	21	ВЖ (12/57,1)	МНП (9/42,9)			
	ВО	21	Н (8/38,1)	С (9/42,9)	В (4/19,0)		
	ФКО	21	ОПК (17/81,0)	ОФ (4/19,0)			
	ПКО	21	Г (3/14,3)	С (15/71,4%)	РП (3/14,3)		
	ФЛ	21	ЭФ (3/14,3)	ПЭ (4/19,0)	ОЭ (14/66,7)		
	ПЛС	21	СПЛ (8/38,1)	СОП (13/61,9)			
П2 *Sorbus persica*	СО	5	ВЖ (1/20,0)	МП (1/20,0)	МНП (3/60,0)		
	ВО	5	Н (3/60,0)	В (2/40,0)			
	ФКО	5	ОПК (4/80,0)	НКО (1/20,0)			
	ПКО	5	С (3/60,0)	РП (2/40,0)			
	ФЛ	5	ЭФ (1/20,0)	ПЭ (1/20,0)	ОЭ (3/60,0)		
П1 *Spiraeanthus schrenckianus*	ПП	12	Н (9/75,0)	С (3/25,0)			
	СО	12	ВЖ (11/91,7)	МП (1/8,3)			
	ВО	12	Н (9/75,0)	С (2/16,7)	В (1/8,3)		
	ПКО	12	Г (2/16,7)	С (7/58,3)	РП (3/25,0)		
	П	12	СП (3/25,0)	С (5/41,7)	ОП (4/33,3)		
	ВПО	12	С (8/66,7)	ВВС (4/33,3)			
П2 *Spiraeanthus schrenck-ianus*	ПП	8	В (7/87,5)	С (1/12,5)			
	ВО	8	Н (7/87,5)	С (1/12,5)			
	ФКО	8	ШК (6/75,0)	ШРФ (2/25,0)			
	ПКО	8	Г (7/87,5)	С (1/12,5)			
	ВПО	8	М (1/12,5)	С (4/50,0)	ВВС (2/25,0)	ВНС (1/12,5)	

Примечание: сокращения приведены в таблице 1 (см. раздел «Материалы и методы»)

Note: abbreviations are deciphered in Table 1 (see the Material and Methods section)

А) *Cotoneaster karatavicus* образец № 3 (П1); **Б**) *Crataegus ambigua* (П3); **В**) *Malus sieversii* (П2); **Г**) *Prunus tenella* (П1); **Д**) *Sibiraea laevigata* (П1); **Е**) *Spiraeanthus schrenckianus* (П1)

Рис. 2. Общий вид, плоды и гербарий растений семейства Rosaceae
Fig. 2. General appearance, fruits and herbarium of Rosaceae plants

Sibiraea laevigata. В месте сбора произрастают *Rosa spinosissima*, *Daphne altaica* Pall. и *Lonicera tatarica*. Все кустарники поражены тлей, отмечается поражение мучнистой росой и грибково-ржавчинными заболеваниями.

Prunus ulmifolia. Отмечено слабое плодоношение. Вредителей и заболеваний не обнаружено.

Sorbus persica. Доминантные виды растений в местах сбора: *Cerasus tianshanica* Pojark., *Crataegus turkestanica* Pojark., *Juniperus semiglobosa* Regel, *Filipendula vulgaris* Moench, *Fraxinus sogdiana* Bunge и другие. Отмечено поражение ржавчиной – 19–31,7%. Плодоношение отсутствовало.

Spiraeanthus schrenckianus. Популяции с *Gaultheria procumbens* L. формируют кустарниковые заросли. Поражаемость растений – 5%, на трех образцах были обнаружены коконы пауков (*Argiope bruennichi* Scopoli).

Введение в культуру in vitro

Для введения в культуру *in vitro Crataegus ambigua* использовали семена, которые проращивали в перлите, однако прорастания не отмечали. Семена боярышника защищены толстой скорлупой, в природных условиях при попадании плодов в землю мякоть плода сгнивает, а скорлупа размягчается, соответственно для прорастания семян в ЛУ требуется больше времени. Поэтому для введения в культуру *in vitro* были использованы изолированные зародышевые оси (табл. 5, рис. 3) (Kheloufi et al., 2019). Для *Malus sieversii* и *Sibiraea laevigata* максимальный процент введения в культуру *in vitro* получали при введении проростков в О1, для *Prunus tenella* максимальный процент введения в культуру *in vitro* получен при введении зародышевых осей на среду Кнопа в О2/2, для *Spiraeanthus schrenckianus* максимальный процент получен в О2/1. Следует отметить, что у всех образцов стратификация при 4°С увеличивала процент всхожести семян. Проращивание семян *in vitro* на среде МС давало стабильно низкие результаты всхожести во всех вариантах. Жизнеспособность семян и зародышевых осей достаточно высокая, также отмечен низкий процент поверхностной (7,2%) и внутренней (22,1%) контаминации в среднем по образцам. Семена, в отличие от побегов, в меньшей степени подвержены инфицированию извне, поэтому в большей части остаются стерильными (Shaik, Thomas, 2019).

Выявлено, что оба метода подходят для введения побегов в культуру *in vitro* в разное время года и при варианте недоступности семян. Процент жизнеспособности в среднем при первом способе составил 57,4%, при втором – 47,6%. Достоверных отличий между вариантами не обнаружено.

Для введения в культуру *in vitro* использовали также побеги *Prunus ulmifolia* и *Malus sieversii*, проросшие из черенков в ЛУ, и побеги, проросшие в естественных условиях (рис. 3, 4).

Микроклональное размножение

Состав питательной среды для размножения в культуре тканей оказывает глубокое влияние как на индукцию образования придаточных побегов, так и на стимулирование пролиферации пазушных побегов (Bonnart et al., 2022; Pasternak, Steinmacher, 2024). Среда МС (Murashige, Skoog, 1962) часто успешно используется для культивирования побегов в культуре *in vitro*, а ее дополнение фитогормонами служит инструментом для регу-

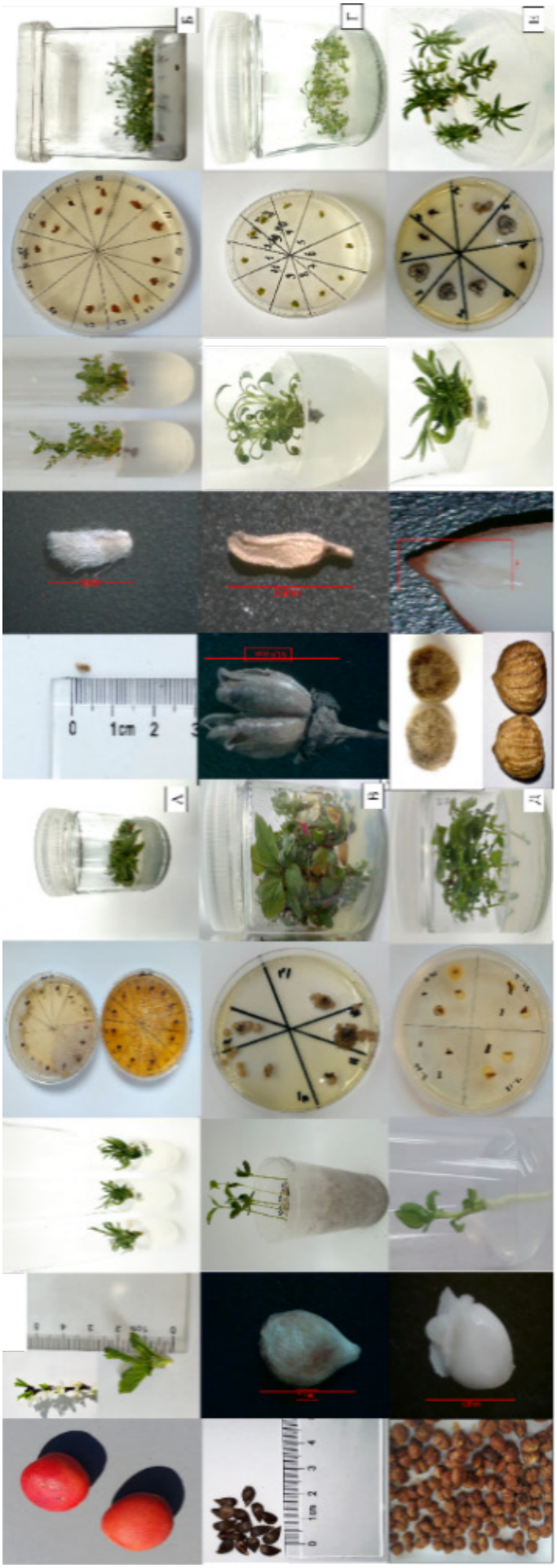
Таблица 5. **Введение в культуру *in vitro* растений семейства Rosaceae**

Table 5. ***In vitro*** **initiation of Rosaceae plants**

Кол-во образцов	Вариант эксперимента	Длительность стерилизации побегов в $HgCl_2$, мин					Асептические побеги после тестирования на среде 523	
		4	5	6	7	9		
		Жизнеспособность побегов, %					шт.	%
Crataegus ambigua								
60	О1	-	0^{f}	-	0^{f}	–	0	–
80	О2/2	$52,6 \pm 8,0^{bc}$	–	$7,3 \pm 4,2^{b}$	–	0^{f}	15	$40,3 \pm 6,7^{cd}$
80	О2/4	$31,7 \pm 7,0^{cd}$	–	$42,2 \pm 4,7^{c}$	–	$7,7 \pm 5,3^{df}$	9	$39,8 \pm 5,1^{cd}$
80	К1	0^{f}	–	0	–	0^{f}	0	0^{f}
Malus sieversii								
60	О1	$29,4 \pm 5,3^{cd}$	–	$45,9 \pm 4,0^{c}$	–	–	16	$72,8 \pm 5,4^{b}$
60	О2/1	$23,7 \pm 12,2^{d}$	–	$37,1 \pm 4,0^{cd}$	–	–	14	$75,1 \pm 13,7^{b}$
60	О2/3	$15,6 \pm 11,8^{df}$	–	$19,1 \pm 4,7^{d}$	–	–	6	$53,9 \pm 6,5^{bc}$
60	К1	$17,8 \pm 12,6^{d}$	–	$22,7 \pm 12,8^{cd}$	–	–	6	$47,3 \pm 8,3^{c}$
60	К2	$32,8 \pm 14,1^{cd}$	–	$37,6 \pm 12,3^{cd}$	–	–	11	$53,8 \pm 7,1^{bc}$
Prunus tenella								
80	О2/2	$22,5 \pm 10,7^{d}$	–	–	$34,3 \pm 7,5^{cd}$	0^{f}	12	$71,4 \pm 8,8^{b}$
80	О2/4	$14,9 \pm 12,8^{df}$	–	–	$19,5 \pm 12,8^{d}$	0^{f}	5	$52,8 \pm 9,3^{bc}$
Sibiraea laevigata								
60	О1	$61,5 \pm 11,7^{bc}$	–	$38,2 \pm 12,6^{cd}$	–	–	30	$100 \pm 0,0^{a}$
60	О2/1	$56,2 \pm 5,7^{bc}$	–	$36,7 \pm 13,1^{cd}$	–	–	29	$100 \pm 0,0^{a}$
60	О2/3	$33,4 \pm 14,4^{cd}$	–	$25,8 \pm 12,9^{d}$	–	–	18	$100 \pm 0,0^{a}$
60	К1	$54,5 \pm 13,5^{bc}$	–	$34,0 \pm 13,3^{cd}$	–	–	27	$100 \pm 0,0^{a}$
60	К2	$56,9 \pm 12,4^{bc}$	–	$37,3 \pm 5,8^{cd}$	–	–	28	$100 \pm 0,0^{a}$
60	К3	$27,1 \pm 14,0^{cd}$	–	$26,9 \pm 5,5^{cd}$	–	–	16	$100 \pm 0,0^{a}$
Spiraeanthus schrenckianus								
60	О1	–	$37,3 \pm 12,2^{cd}$	–	$26,9 \pm 12,3^{cd}$	–	19	$100 \pm 0,0^{a}$
60	О2/1	–	$41,1 \pm 12,5^{c}$	–	$35,6 \pm 14,8^{cd}$	–	23	$100 \pm 0,0^{a}$
60	О2/3	–	$20,9 \pm 14,6^{d}$	–	$12,9 \pm 12,6^{df}$	–	10	$100 \pm 0,0^{a}$
60	К1	–	0^{f}	–	0^{f}	–	–	–
60	К2	–	$30,2 \pm 2\ 0,7^{cd}$	–	$20,5 \pm 12,9^{d}$	–	15	$100 \pm 0,0^{a}$
60	К3	–	$13,7 \pm 12,9^{df}$	–	$9,5 \pm 11,9^{df}$	–	14	$100 \pm 0,0^{a}$
Ср. знач. ± ст. откл		$33,2 \pm 18,2^{cd}$	$20,5 \pm 15,5^{d}$	$29,3 \pm 13,3^{cd}$	$17,7 \pm 13,3^{d}$	$1,5 \pm 3,4^{f}$	14	$73,1 \pm 32,9^{b}$

Примечание: данные представляют собой среднее значение ± SE; значения, сопровождаемые различными буквами в каждом разделе, значительно различались при $p \le 0,05$ с использованием теста разделения Тьюки

Note: the data represent mean ± SE; the values accompanied by different letters in each section were significantly different at $p \le 0.05$ using Tukey's split test



А) *Prunus ulmifolia*; **Б)** *Spiraeanthus schrenckianus*; **В)** *Malus sieversii*; **Г)** *Sibiraea laevigata*; **Д)** *Crataegus ambigua*; **Е)** *Prunus tenella*

Рис. 3. Введение в культуру *in vitro* растений семейства Rosaceae (семена, черенки, *in vitro* побеги, тестирование *in vitro* побегов на среде 523)

Fig. 3. *In vitro* initiation of Rosaceae plants (seeds, cuttings, *in vitro* shoots, and *in vitro* testing of shoots on medium 523)

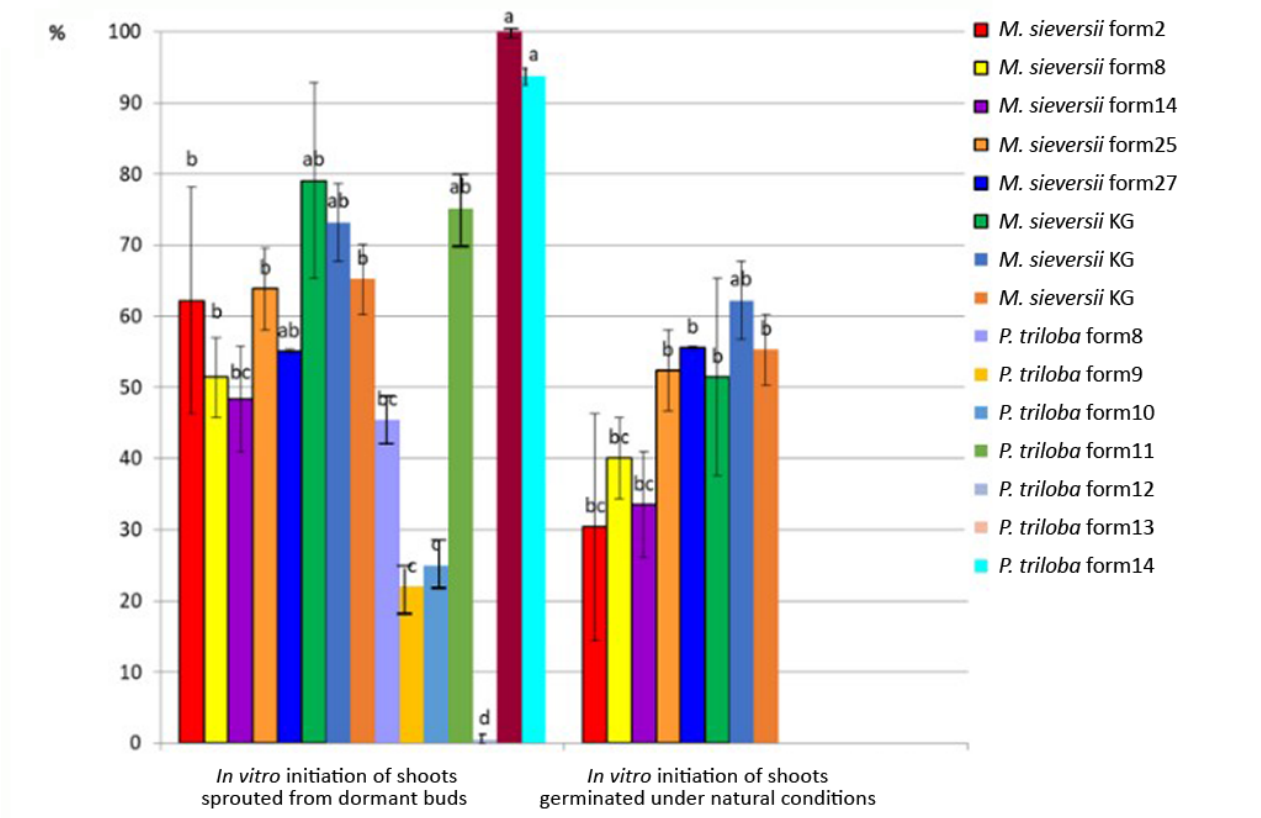


Рис. 4. Введение в культуру *in vitro* побегов *Prunus ulmifolia* Franch. и *Malus sieversii* (Ledeb.) M. Roem.

Fig. 4. *In vitro* initiation of *Prunus ulmifolia* Franch. and *Malus sieversii* (Ledeb.) M. Roem. shoots

лирования различных процессов в культуре растительных тканей.

Ауксины и цитокинины являются наиболее часто используемыми фитогормонами и часто используются в сочетании (Bonnart et al., 2022; Romadanova et al., 2024). В данном исследовании проводился поиск идеального баланса фитогормонов в среде МС для 5 видов растений семейства Rosaceae (табл. 6).

У всех образцов не выявили признаков инфицирования во время фазы размножения, что является показателем того, что предварительный скрининг на наличие потенциальных загрязнителей был эффективным.

В результате было установлено, что для *Crataegus ambigua* требуется пониженное содержание 0,2 мг/л БАП и 0,01 ИМК, для *Prunus ulmifolia* требуется более высокая концентрация 0,5 мг/л БАП. Для *Spiraeanthus schrenckianus* требуются состав и концентрация фитогормонов, близкая к составу питательной среды для *Malus*, оптимизация которой проводилась ранее (Romadanova et al., 2016).

Для *Prunus tenella* необходимо добавление хеллата железа, а для *Sibiraea laevigata* – ГК. Следует отметить, что для *Crataegus ambigua* (КР2,0) и *Prunus tenella* (КР2,5) эксперименты по оптимизации состава питательных сред продолжаются, но уже сейчас у всех образцов отмечены листья с интенсивной зеленой окраской, отсутствие витрифицированных или некротических побегов (см. рис. 3).

Таблица 6. Коэффициент размножения в культуре тканей побегов Rosaceae

Table 6. Multiplication rates in tissue culture of Rosaceae shoots

Вариант питательной среды	Наименование образца, КР				
	Crataegus ambigua	*Prunus tenella*	*Prunus ulmifolia*	*Sibiraea laevigata*	*Spiraeanthus schrenckianus*
1	1,2	2,8	2,8	2,6	1,2
2	2,0	2	2,5	3	1
3	1	2,5	3,5	4,4	1,3
4	1,2	1,5	3,1	5,5	1
5	1,1	1,8	2	2,6	1,2
6	–	–	–	–	3,5
7	–	–	–	–	4

Заключение

Популяции редких и исчезающих растений семейства Rosaceae подвергаются воздействиям болезней и вредителей, находясь во многих случаях в крайне неудовлетворительном состоянии. В частности, стоит отметить, что всего известно о двух популяциях *Rosa cinnamomea*, в ходе экспедиции в первую точку произрастания не был обнаружен ни один образец этого вида. Более того, в течение двух последних лет экспедиции по сбору *Sorbus persica* плоды также не встречали, плодоношение не фиксируется уже в последние четыре года. Таким образом, проделанная работа по изучению состояния этих популяций подчеркивает необходимость применения комплексного подхода к сохранению биоразнообразия. Важны дальнейшие усилия по защите местообитаний, а также разработка и внедрение методов сохранения, таких как культура *in vitro* и криогенные банки. Эти меры содействуют сохранению уникальных видов и их генетического материала для грядущих поколений.

References / Литература

Afifi L., Lapin K., Tremetsberger K., Konrad H. A systematic review of threats, conservation, and management measures for tree species of the family Rosaceae in Europe. *Flora*. 2023;301:152244. DOI: 10.1016/j.flora.2023.152244

Bonnart R.M., Chen K.Y., Volk G.M. Plant tissue culture media preparation. In: G.M. Volk, K. Chen (eds). *Training in Plant Genetic Resources: Cryopreservation of Clonal Propagules*. Fort Collins, CO: Colorado State University: 2022. Available from: https://colostate.pressbooks.pub/clonalcryopreservation/chapter/media [accessed Jan. 21, 2025].

Coelho N., Gonçalves S., Romano A. Endemic plant species conservation: Biotechnological approaches. *Plants*. 2020;9(3):345. DOI: 10.3390/plants9030345

Country report on the state of plant genetic resources for food and agriculture in the Kazakhstan Republic. Almaty: Scientific and Production Center of Farming and Plant Growing; 2007. Available from: https://www.fao.org/4/i1500e/Kazakhstan.pdf [accessed Jan. 21, 2025].

FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations: [website]. Available from: https://www.fao.org/home/en [accessed Jan. 21, 2025].

Hogg R. The British pomology: the history, description, classification, and synonymes, of the fruits and fruit trees of Great Britain. Cambridge: Cambridge University Press; 2012. DOI: 10.1017/CBO9781139108270

Kheloufi A., Mansouri L.M., Vanbellinghen C. Seed germination of *Crataegus monogyna* – a species with a stony endocarp. *Reforesta*. 2019;7(7):73-80. DOI: 10.21750/REFOR.7.06.68

Kim H.H., Popova E., Shin D.J., Yi J.Y., Kim C.H., Yoon M.K. et al. Cryobanking of Korean *Allium* germplasm collections: Results from a 10 year experience. *CryoLetters*. 2012;33(1):45-57.

Knop W. Quantitative Utersuchungen Über den Ernährungensprozeß der Pflanze. *Landwirtschaftliche Versuchsstation*. 1865;7:93-107. [in German]

Kovalchuk I., Zhumagulova Z., Turdiev T., Reed B.M. Growth medium alterations improve *in vitro* cold storage of pear germplasm. *CryoLetters*. 2014;35(3):197-203.

Kumar N., Reddy M.P. *In vitro* plant propagation: A review. *Journal of Forest and Environmental Science*. 2011;27(2):61-72. DOI: 10.7747/JFS.2011.27.2.1

Kushnarenko S.V., Romadanova N.V., Aralbayeva M.M. Current state and *in vitro* conservation of the only endangered population of *Corylus avellana* in Kazakhstan. *Research on Crops*. 2020;21(4):681-686. DOI: 10.31830/2348-7542.2020.106

Kushnarenko S.V., Rymkhanova N.K, Aralbayeva M.M., Romadanova N.V. *In vitro* cold acclimation is required for successful cryopreservation of *Juglans regia* L. shoot tips. *CryoLetters*. 2023;44(4):240-248. DOI: 10.54680/fr23410110612

Lateur M., Dapena E., Szalatnay D., Gantar M.E., Guyader A., Hjalmarsson I., Höfer M., Ikase L., Kellerhals M., Lacis G., Militaru M., Miranda Jiménez C., Osterc G., Rondia A., Volens K., Zeljković M.K., Ordidge M. ECPGR characterization and evaluation descriptors for apple genetic resources. Apple (*Malus* × *domestica*). Rome: ECPGR; 2022. Available from: https://www.ecpgr.org/fileadmin/bioversity/publications/pdfs/2022_ECPGR_Malus_descriptors_final.pdf [accessed Jan. 21, 2025].

Mammadov T., Abbaszade Z. Rare endangered species of the Rosaceae family of the *Rosa* L. genus in the flora of Azerbaijan. *Bulletin of Science and Practice*. 2022;8(4):51-57. DOI: 10.33619/2414-2948/77/05

Marchese C. Biodiversity hotspots: A shortcut for a more complicated concept. *Global Ecology and Conservation.* 2015;3:297-309. DOI: 10.1016/j.gecco.2014.12.008

Molkanova O.I., Vasilyeva O.G., Konovalova L.N. The scientific basis for conservation and sustainable reproduction of plant genofond in culture *in vitro*. *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*. 2015;25(2):95-100. [in Russian] (Молканова О.И., Васильева О.Г., Коновалова Л.Н. Научные основы сохранения и устойчивого воспроизводства генофонда растений в культуре *in vitro*. *Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле*. 2015;25(2):95-100).

Murashige T., Skoog F.A. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*. 1962;15(3):473-497. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x

Myers N., Mittermeier R.A., Mittermeier C.G., da Fonseca G.A., Kent J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*. 2000;403(6772):853-858. DOI: 10.1038/35002501

Pasternak T.P., Steinmacher D. Plant growth regulation in cell and tissue culture *in vitro. Plants (Basel)*. 2024;13(2):327. DOI: 10.3390/plants13020327

Petruzzello M. List of economically important members of the family Rosaceae. In: *Britannica*; 2024. Available from: https://www.britannica.com/plant/Rosaceae [accessed on Jan. 14, 2025].

Popov A.S., Popova E.V., Nikishina T.V., Vysotskaya O.N. Cryobank of plant genetic resources in Russian Academy of Sciences. *International Journal of Refrigeration*. 2006;29(3):403-410. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2005.07.011

Red Data Book of Kazakhstan. Vol. 2. Plants. 2nd ed. Astana: ArtPrintXXI; 2014. [in Russian] (Красная книга Казахстана. Т. 2. Растения. 2-е изд. Астана: АртPrintXXI; 2014).

Reed B.M. (ed.). Plant cryopreservation: A practical guide. New York, NY: Springer Verlag; 2008. DOI: 10.1007/978-0-387-72276-4

Romadanova N.V., Aralbayeva M.M., Zemtsova A.S., Alexandrova A.M., Kazybayeva S.Zh., Mikhailenko N.V. et al. *In vitro* collection for the safe storage of grapevine hybrids and identification of the presence of *Plasmopora viticola* resistance genes. *Plants*. 2024;13(8):1089. DOI: 10.3390/plants13081089

Romadanova N.V., Kushnarenko S.V. Conservation of plant biodiversity by biotechnology methods. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(1):239-248. [in Russian] (Ромаданова Н.В., Кушнаренко С.В. Сохранение биоразнообразия растений методами биотехнологии. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(1):239-248). DOI: 10.30901/2227-8834-2023-1-239-248

Romadanova N.V., Mishustina S.A., Matakova G.N., Kushnarenko S.V., Rakhimbaev I.R., Reed B.M. *In vitro* collection of *Malus* shoot cultures for cryogenic bank development in Kazakhstan. *Acta Horticulturae*. 2016;1113:271-277. DOI: 10.17660/ActaHortic.2016.1113.40

Shaik S.P., Thomas P. *In vitro* activation of seed-transmitted cultivation-recalcitrant endophytic bacteria in tomato and host–endophyte mutualism. *Microorganisms*. 2019;7(5):132. DOI: 10.3390/microorganisms7050132

SYSTAT 13.0.5: [website]. Available from: https://systat.informer.com/13.0 [accessed Jan. 21, 2025].

Vinoth A., Ravindhran R. *In vitro* propagation – a potential method for plant conservation. *International Journal of Computing Algorithm*. 2013;2:268-272.

Viss P.R., Brooks E.M., Driver J.A. A simplified method for the control of bacterial contamination in woody plant tissue culture. *In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant*. 1991;27(1):42. DOI: 10.1007/BF02632060

Информация об авторах

Алина Сергеевна Земцова, младший научный сотрудник, Институт биологии и биотехнологии растений, 050040 Казахстан, Алматы, ул. Тимирязева, 45, zemtsovaaalina@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0258-9448

Назира Алтайқызы Алтаева, старший научный сотрудник, Институт биологии и биотехнологии растений, 050040 Казахстан, Алматы, ул. Тимирязева, 45, altnazira@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-5039-8999

Молдир Маликовна Аралбаева, научный сотрудник, Институт биологии и биотехнологии растений, 050040 Казахстан, Алматы, ул. Тимирязева, 45, berim.moldir@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2322-8054

Наталья Анатольевна Артимович, лаборант, Институт биологии и биотехнологии растений, 050040 Казахстан, Алматы, ул. Тимирязева, 45, artimovich_nata@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-5354-8069

Арман Болатханулы Толеген, старший научный сотрудник, Институт биологии и биотехнологии растений, 050040 Казахстан, Алматы, ул. Тимирязева, 45, докторант, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, 050040 Казахстан, Алматы, пр. Аль-Фараби, 71, tolegenarman7@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-3747-2330

Светлана Вениаминовна Кушнаренко, кандидат биологических наук, профессор, заведующая лабораторией, Институт биологии и биотехнологии растений, 050040 Казахстан, Алматы, ул. Тимирязева, 45, svetlana_bio@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1926-0091

Ескендир Яковлевич Сатеков, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Институт биологии и биотехнологии растений, 050040 Казахстан, Алматы, ул. Тимирязева, 45, irokezz@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0001-6625-0043

Наталья Викторовна Премина, старший научный сотрудник, Западно-Алтайский государственный природный заповедник, 070000 Казахстан, Риддер, Семипалатинская ул., 9, Preminanv@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0792-1086

Наталья Владимировна Ромаданова, кандидат биологических наук, ассоциированный профессор, ведущий научный сотрудник, Институт биологии и биотехнологии растений, 050040 Казахстан, Алматы, ул. Тимирязева, 45, nata_romadanova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1052-2753

Information about the authors

Alina S. Zemtsova, Associate Researcher, Institute of Plant Biology and Biotechnology, 45 Timiryazev St., Almaty 050040, Kazakhstan, zemtsovaaalina@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-0258-9448

Nazira A. Altayeva, Senior Researcher, Institute of Plant Biology and Biotechnology, 45 Timiryazev St., Almaty 050040, Kazakhstan, altnazira@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-5039-8999

Moldir M. Aralbaeva, Researcher, Institute of Plant Biology and Biotechnology, 45 Timiryazev St., Almaty 050040, Kazakhstan, berim.moldir@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2322-8054

Natalya A. Artimovich, Laboratory Assistant, Institute of Plant Biology and Biotechnology, 45 Timiryazev St., Almaty 050040, Kazakhstan, artimovich_nata@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-5354-8069

Arman B. Tolegen, Senior Researcher, Institute of Plant Biology and Biotechnology, 45 Timiryazev St., Almaty 050040, Kazakhstan, PhD Student, al-Farabi Kazakh National University, 71 Al-Farabi Ave., Almaty 050040, Kazakhstan, tolegenarman7@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-3747-2330

Svetlana V. Kushnarenko, Cand. Sci. (Biology), Professor, Head of a Laboratory, Institute of Plant Biology and Biotechnology, 45 Timiryazev St., Almaty 050040, Kazakhstan, svetlana_bio@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1926-0091

Yeskendir Ya. Satekov, Cand. Sci. (Biology), Researcher, Institute of Plant Biology and Biotechnology, 45 Timiryazev St., Almaty 050040, Kazakhstan, irokezz@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0001-6625-0043

Natalya V. Premina, Senior Researcher, West Altai State Nature Reserve, 9 Semipalatinskaya St., Ridder 070000 Kazakhstan, Preminanv@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0792-1086

Natalya V. Romadanova, Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Leading Researcher, Institute of Plant Biology and Biotechnology, 45 Timiryazev St., Almaty 050040, Kazakhstan, nata_romadanova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1052-2753

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 31.01.2025; одобрена после рецензирования 26.05.2025; принята к публикации 18.08.2025.
The article was submitted on 31.01.2025; approved after reviewing on 26.05.2025; accepted for publication on 18.08.2025.

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article
UDC 633.34:581.543(470.311)
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-57-67

CC BY

The effect of the starting nitrogen dose under different irrigation regimes on the yield of Kabuli chickpeas

Hussein H. B. Al-Allo[1], Mohsen Janmohammadi[1], Mohsen Kheyrkhah[2], Naser Sabaghnia[1]

[1] *University of Maragheh, Maragheh, Iran*

[2] *Agriculture Organization of Qazvin Province, Iran*

Corresponding author: Mohsen Janmohammadi, mjanmohammadi@maragheh.ac.ir

Background. The aggravation of the water shortage problem caused by climate change in drought-prone areas emphasizes the use of climate-smart plants and climate-smart agriculture practices. Thus, the management of nitrogen fertilizers and controlling the amount of water consumed by crops seem very important issues.
Materials and methods. A field trial was aimed to evaluate chickpea phenology, morphology, and yield under different doses of nitrogen (0, 20, and 40 kg ha^{-1}) and irrigation regimes (I_1: well-watered, I_2: rainfed, I_3: supplemental irrigation during the flowering, I_4: supplemental irrigation during the flowering and seed setting) in chickpea drylands of Kermanshah, Western Iran.
Results. Although N application slightly delayed the phenological stages, soil moisture deficiency significantly accelerated flowering and maturity. The highest rooting depth was recorded for $I_2 + N_{40}$, and the lack of soil moisture increased the longitudinal root growth. However, the number of root nodules (created by symbiotic relationship) under rainfed (I_2) and one-time supplemental irrigation (I_3) showed the lowest values of 7.30 and 6.70, respectively. Supplemental irrigation (SI) improved the grain yield components compared to the rainfed condition, but the difference in grain yield between SI and I_1 was still evident. The highest amounts of vegetative growth and yield were recorded under $I_1 + N_{20}$ and $I_1 + N_{40}$. The highest values of water-use efficiency for grain yield (WUE_G) resulted under $I_2 + N_{40}$.
Conclusion. WUE_G under rainfed conditions was 41%, 17% and 24% higher than I_1, I_3, and I_4, respectively. The highest biomass-based water use efficiency (WUE_B) was obtained under $I_1 + N_{40}$ and $I_2 + N_0$ or N_{20}. Although I_4 produced a lower grain yield than well-watered conditions (ca. 400 kg ha^{-1}), due to the water scarcity in the semi-arid regions, I_4 with the N application of 20 or 40 kg ha^{-1} is still recommended for small-scale farmers as an efficient smart-agriculture practice.

Keywords: rainfed, reproductive growth, supplemental irrigation, water deficit, grain and biomass yield, water-use efficiency of plants

Acknowledgements: the presented results are part of the thesis No. 1918228. The authors thank the financial support provided by University of Maragheh. We are also grateful for the cooperation and assistance of the Graduate Education Department and the Research and Technology Department of the said university. We thank the local experts for their cooperation in collecting agricultural data and conducting field irrigation.
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Al-Allo H.H.B., Janmohammadi M., Kheyrkhah M., Sabaghnia N. The effect of the starting nitrogen dose under different irrigation regimes on the yield of Kabuli chickpeas. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(3):57-67. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-57-67

© Al-Allo H.H.B., Janmohammadi M., Kheyrkhah M., Sabaghnia N., 2025

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-57-67

Влияние начальной дозы азота при различных режимах орошения на урожайность нута сортотипа Кабули

Х. Х. Б. Аль-Алло[1], М. Джанмохаммади[1], М. Хейрха[2], Н. Сабагния[1]

[1] *Университет Мараге, Мараге, Иран*

[2] *Сельскохозяйственная организация провинции Казвин, Казвин, Иран*

Автор, ответственный за переписку: Мохсен Джанмохаммади, mjanmohammadi@maragheh.ac.ir

Актуальность. Усугубление проблемы нехватки воды, вызванное изменением климата в засушливых районах, подчеркивает необходимость использования климатически умных растений и климатически умной агротехники. В этом контексте важно регулировать нормы азотных удобрений и контролировать количество воды, потребляемой сельскохозяйственными культурами.
Материалы и методы. Оценивали фенологические, морфологические показатели, рост корней и урожайность нута при различных дозах азота (0, 20 и 40 кг/га) и режимах орошения (I_1 – обильный полив, I_2 – богарный, I_3 – дополнительное орошение во время цветения, I_4 – дополнительное орошение во время цветения и завязывания семян) на плантациях нута на засушливых землях Керманшаха в западном Иране.
Результаты. Хотя внесение азота немного задержало фенологические стадии, дефицит почвенной влаги значительно ускорил цветение и созревание. Наибольшая глубина корней зафиксирована в условиях $I_2 + N_{40}$, а недостаток почвенной влаги увеличил длину корней. Однако количество корневых клубеньков при низкой почвенной влажности (I_2 и I_3) показало наименьшие значения: 7,30 и 6,70 соответственно. Дополнительное орошение (SI) улучшило компоненты урожая зерна по сравнению с богарой; разница в урожайности между режимами SI и I_1 была достоверна. Наибольший вегетативный рост и урожайность зафиксированы в условиях $I_1 + N_{20}$ и $I_1 + N_{40}$. Самые высокие значения эффективности использования воды для урожайности зерна (WUE_G) отмечали в условиях $I_2 + N_{40}$.
Заключение. WUE_G в богарных условиях была на 41%, 17% и 24% выше, чем при режимах орошения I_1, I_3 и I_4 соответственно. Наивысшая эффективность использования воды по урожайности биомассы (WUE_B) получена при $I_1 + N_{40}$ и $I_2 + N_0$ или N_{20}. Хотя урожай зерна при I_4 был ниже, чем в хорошо орошаемых условиях (около 400 кг/га), из-за нехватки воды в полузасушливых регионах для мелких фермеров рекомендуется I_4 с внесением 20 или 40 кг/га азота как эффективная практика умного сельского хозяйства.

Ключевые слова: богарный, репродуктивный рост, дополнительное орошение, дефицит воды, урожайность зерна и биомассы, эффективность использования воды растениями

Благодарности: представленные результаты являются частью диссертации № 1918228. Авторы признательны Университету Мараге за финансовую поддержку, а также Департаменту послевузовского образования и Департаменту исследований и технологий вышеназванного университета за сотрудничество и помощь. Мы благодарим местных экспертов за сотрудничество в сборе сельскохозяйственных данных и проведении полевого орошения.
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Аль-Алло Х.Х.Б., Джанмохаммади М., Хейрха М., Сабагния Н. Влияние начальной дозы азота при различных режимах орошения на урожайность нута сортотипа Кабули. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(3):57-67. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-57-67

Introduction

Chickpea is one of the cold-season food legumes with the scientific name *Cicer arietinum* L., which is also known as gram, garbanzo, and chana (Sharma et al., 2013). Archaeological studies indicate that the development of chickpeas took place in the Mediterranean regions of Asia, such as Syria, and the records of planting this crop go back to 8000 BC (Zhang et al., 2024). Due to its relatively high compatibility with such environmental stresses as heat stress and drought, its ability to biologically fix atmospheric nitrogen and the high percentage of seed protein, this plant has been the focus of researchers' attention in Mediterranean areas and developing countries (Karalija et al., 2022). In recent decades, with the intensification of climate change, such as decreasing rainfall and increasing temperature in semi-arid regions, the necessity of using climate-smart plant species and efficient and climate-compatible agricultural practices has become more evident (Benitez-Alfonso et al., 2023).

However, one of the major chickpea-producing areas is the semi-arid regions in the West Asia to North Africa, gravely affected by climate change, and the implementation of smart climate management in these areas should be followed seriously (Mohammed et al., 2016). Winter cereals are the predominant crops in the semi-arid regions, and the low variety of plant species in crop rotations has caused these agroecosystems to be fragile and highly vulnerable (Ryan et al., 2008). Therefore, replacing drought-resistant plant species in crop rotations that have an ideal growth form and reasonable economic production in drought-prone areas can be a solution. At first glance, the focus should be directed toward the selection and investigation of new plants or underutilized or forgotten plants. The former plants have been discarded due to incomplete breeding processes and low performance under the intensive farming conditions. However, the adverse conditions caused by climate change in the mentioned areas have created a necessity for a return to these plants. Cool-season food legumes have unique features that can place them among climate-smart plants. Relatively short growth period, suitable for planting in areas with moderate winters and exploitation of winter rains, appropriate rooting depth, and ability to adapt phenological and morphophysiological characteristics to water shortage conditions are among the efficient climate-compatible strategies (Andrews, Hodge, 2010).

However, semi-arid rainfed areas have poor soils, exhibiting very low organic matter, high pH, coarse-grained texture, nutrient deficiency in the rhizosphere environment, low water holding capacity, low cation-exchange capacity, shallow soil depth, high soil compaction, and low permeability, undesirably impact performance of cold-season food legumes, such as chickpeas (Ayangbenro, Babalola, 2021). In such soils, careful nutritional management, such as nitrogen application, is important. Starter fertilizer refers to the use of small amounts of nutrients in the soil during planting to meet the plant's nutritional needs until the complete seedling establishment, root development in the soil, and the formation of nitrogen-fixing nodules (Galpottage Dona et al., 2020).

Although legumes are atmospheric nitrogen fixers, it seems that providing nutrients through fertilizers is essential until the plant is fully established and provided there are suitable and compatible symbiotic diazotrophic bacteria strains. This means that the production of chickpeas in semi-arid areas has many limitations, such as the insufficient population of indigenous soil rhizobia, unsuitable temperature conditions and low soil moisture, soil with low fertility, insufficient and unscientific fertilizer utilization, and asymmetrical distribution of rainfall and other similar restrictions (Gopalakrishnan et al., 2018). Therefore, under the mentioned conditions, the initial application of N fertilizers will help to improve the seedling growth and accelerate the establishment process. However, identifying the appropriate doses of N for starter fertilizer in each agroclimatic zone will need to be investigated. In the western regions of Iran, which are the main production areas of rainfed chickpeas, due to the irregular distribution of rainfall and the concentration of rainfall during the cold months, the plant faces a soil water deficit during the reproductive stages (Kheiri et al., 2021). This situation has become more complicated during the last decades with climate changes. Due to the limitation of available water sources for irrigation, the irrigation scheduling should be considered carefully under irrigated conditions.

Studies show that using one- or two-time irrigation during the sensitive stages of chickpeas under rainfed conditions can mitigate the effect of terminal drought stress (Shamsi et al., 2010; Ouji et al., 2016; Janmohammadi et al., 2024). The mentioned technique is called supplementary irrigation (SI). However, the amount of water used and the growth stage of the plant, the environmental and edaphic conditions, and the genotype of the plant can affect the efficiency of SI (Chauhan et al., 2019). The present experiment was conducted to evaluate the use of different doses of nitrogen starter and supplementary irrigation during different stages on the growth and performance of chickpeas in Western Iran.

Material and methods

This experiment was conducted during the 2023/2024 crop season on a farm in the Sararood-Kermanshah (34°33'N, 47°32'E; 1356 m above sea level) in the west of Iran. Long-term meteorological data in the tested area indicate that the average rainfall was 485 mm. The mean annual air temperature was 13.85°C. The maximum temperature was 39°C. The minimum air temperature was –19°C, the number of rainy days was 78 days, the number of days with sub-zero temperatures was 88 days, and the number of sunny hours was 1618. Temperature conditions and monthly rainfall during the growing season are shown in Fig. 1. According to the FAO classification, the soils in the studied area were the Lixisols, and the soil moisture and temperature regimes in this area were dry xeric and mesic, respectively. Based on the soil analysis and the data available at the station, the soil texture was silty loam up to 40 cm deep and included 22% of sand, 47% of silt, and 31% of clay. The chemical characteristics of the soil were as follows: electrical conductivity: 0.56 ds m^{-1}; total N: 0.13%; K: 256 mg kg^{-1}; organic matter: 0.82 g kg^{-1}; available P: 11.39 mg kg^{-1}, pH: 7.2. Soil moisture content during different periods of the growing season was evaluated using methods based on the time-domain reflectometry (TDR).

The initial tillage including plowing was done by a moldboard plow during October 2023. Farmyard manure was distributed over the soil at the rate of 20 t ha^{-1} after initial tillage. In the third decade of March 2024, the second tillage including crushing of clods through disk plows and a rotary cultivator was completed. After determining the area of the main plots, the range of the main and secondary plots was determined through the border disc. Harrows and trowels were used to soften the soil surface before planting seeds. The soil was formed as ridge-furrow configuration through a furrower. Phosphorus was provided by triple superphosphate through furrow digging in the ridge area at the rate of 80 kg ha^{-1}. N starter fertilizers were also used in sub-plots at the rate of 0, 20, and 40 kg ha^{-1} of nitrogen through urea fer-

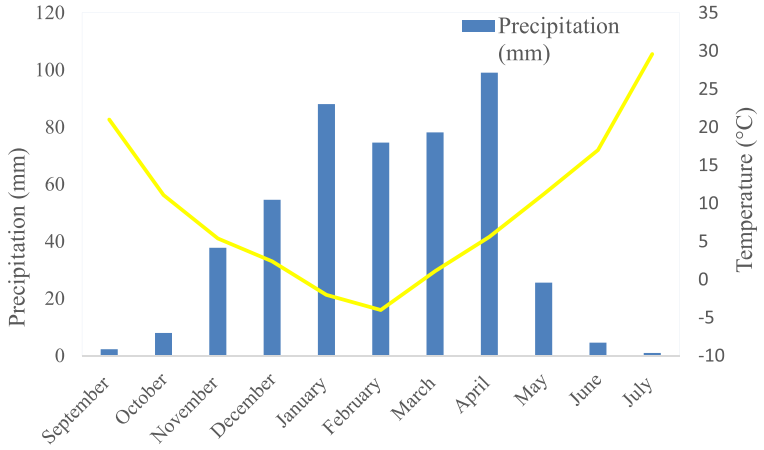


Fig. 1. Distribution of temperatures and precipitation amounts during the 2023/2024 cropping season
Рис. 1. Распределение температуры и количества осадков в период вегетации 2023/2024 г.

tilizer. The 'Arman' chickpea cultivar (FLIP 90-96 C) was provided by the Dryland Agricultural Research Institute (DARI). Cv. 'Arman' has a higher yield compared to other local cultivated varieties and is also resistant to blight disease. This cultivar is relatively tall, suitable for mechanized harvesting, and well adapted to the northern and western regions of Iran. The cultivar can be grown in autumn in subtropical regions. Seed planting was done manually and with a ridge and furrow planting pattern on top of the ridges with a depth of 10 cm. Inter- and intra-row spacing was 25 and 5 cm, respectively. Seeds were sown in rows in March. Each experimental plot had an area of 16 m^2 (4 × 4). The weeds were controlled by hand weeding during different periods. Water was supplied to the plots through polyethylene pipes equipped with volume-measuring meters. Field trial designed as a split-plot based on the arbitrary complete blocks design with 5 replications. Experimental treatments included different irrigation regimes at 4 levels and the utilization of starter nitrogen fertilizer at 3 doses. Irrigation regimes were as follows: I_1 – well-irrigated; I_2 – rainfed (without irrigation); I_3 – supplementary irrigation in the flowering stage (150 mm); I_3 – supplementary irrigation in the flowering and seed setting stages (250 mm). Irrigation levels were assigned to the main plots. The sub-plots contained different doses of nitrogen starter fertilizer (0, 20, and 40 N kg ha^{-1}). The field was periodically and regularly monitored and the phenological stages, such as the number of days to germination, the number of days from planting to reaching 50% flowering, and the number of days from planting to reaching physiological maturity, were recorded.

The chlorophyll content of the leaf was measured through a chlorophyll meter (SPAD-502, Minolta, Japan) at the full flowering stage. At the end of the flowering stage, by digging pits, the maximum amount of root penetration into the soil depth was checked and measured. In the maturity stage, the entire shoots above the soil surface were cut from the ground and after drying at 70 C for 72 hours, their weight was measured and reported as dry biomass. Using a quadrat, plants were randomly harvested in an area of 1 m^2 and grain yield components were measured. Water use efficiency was calculated from the ratio of grain yield to water used and reported as grain yield-level water use efficiency (WUE_G). Biomass-water use efficiency (WUE_B) was calculated as the ratio of total dry matter produced above the soil surface to the amount of water consumed. Canopy spread was obtained by measuring the canopy diameter from left to right at the seed filling stage, assuming that the canopy was elliptical. Evapotranspiration (EVP) from soil was measured by Time Domain Reflectometry techniques (TDR-420, USA). The number of root nodules per plant (RNN) was determined by digging out the soil next to the plant and gently pulling the roots out of the soil. LSD mean comparison was done through SPSS Statistics. Component analysis (PCA) and clustering of treatments were made with the SAS and Genstat software. The matrix of means of traits × treatment combinations were used for multivariate analysis, such as cluster analysis, PCA, and TT biplot. Ward's method was used for clustering, with considering Euclidean distances between clusters.

Results and discussion

The evaluation of plant vegetative growth characteristics, such as plant height, canopy width, and dry biomass, indicated significant interaction effects of N × I (Table 1). The tallest plants were recorded under the conditions of $I_1 + N_{40}$ (43.7 cm), and the shortest plants were observed under rainfed conditions without nitrogen application (25.6 cm). Plant height increased with increasing nitrogen consumption at all irrigation levels. A similar tendency was observed for canopy width (plant lateral growth). Application of twofold supplemental irrigation could produce a canopy width similar to plants grown under full irrigation. I_1, I_3, and I_4 increased canopy height by 48%, 24%, and 50% versus the rain conditions. The dry biomass produced in the grown plants with the application of 20 and 40 kg ha^{-1} of nitrogen had no significant differences (see Table 1).

However, the highest amount of biomass was observed under I_1+N_{40} conditions (6068 kg ha^{-1}) and the lowest amount was related to rainfed conditions (2525 kg ha^{-1}). The evaluation of root characteristics showed that, regardless of the application rate, nitrogen utilization increased the rooting depth significantly (12%). The comparison of rooting depth between irrigation regimes indicated that I_2, I_3, and I_4 increased the rooting depth by 39%, 37%, and 36% compared to full irrigation conditions (see Table 1).

Utilization of 20 and 40 kg ha^{-1} increased the number of root nodules by 4% and 13% compared to the control. The highest number of root nodules was recorded under full irrigation conditions with the N application of 20 or 40 kg ha^{-1} (16.62, and 18.04). Fertilizer application under I_4 conditions decreased the number of nodules by 22% and 26%, while the application of N_{40} under rainfed conditions increased the number of root nodules by 36% (see Table 1). Plant phenology monitoring showed that the numbers of days to flower-

Table 1. **The effects of nitrogen doses and irrigation regimes on vegetative growth characteristics of chickpea**
Таблица 1. **Влияние доз азота и режимов орошения на вегетативные характеристики роста нута**

Effect	PE	RD	RNN	LCH	CS	DFL
Nitrogen						
N_0	31.92c	47.8b	9.50b	49.95c	26.78c	66.78c
N_{20}	34.59b	52.3a	9.83ab	55.18a	33.54b	71.11b
N_{40}	37.09a	54.35a	10.68a	52.21b	35.85a	74.12a
Irrigation						
I_1	41.04a	40.13b	15.95a	60.83a	36.30a	74.71a
I_2	27.26d	55.73a	7.30c	41.78d	24.49c	63.21d
I_3	33.94c	55.33a	6.70c	52.27c	30.49b	71.54c
I_4	35.90b	54.73a	10.05b	54.90b	36.96a	73.21a
Combined						
I_1N_0	37.64bc	38.6f	13.2b	57.41c	0.90e	369.9de
I_1N_{20}	39.62a	41.2f	16.62a	64.07a	34.91c	73.82bc
I_1N_{40}	45.88a	40.6f	18.04a	61.02b	43.10a	80.424a
I_2N_0	25.23h	49e	6.31f	39.31g	20.88h	59.208h
I_2N_{20}	27.33gh	56.4abcd	6.28f	44.67f	26.83f	64.38g
I_2N_{40}	29.24g	61.8a	9.34de	41.38g	25.75fg	66.06fg
I_3N_0	32.12f	52.8cde	6.444f	48.74e	23.932g	68.34ef
I_3N_{20}	34.48def	54bcde	6.4f	54.16d	33.94cd	72.3cd
I_3N_{40}	35.22cde	59.2ab	7.28ef	53.91d	33.62cde	74bc
I_4N_0	32.70ef	50.8de	12.06bc	54.37d	31.44de	69.68de
I_4N_{20}	36.96bcd	57.60abc	10.04cd	57.83c	38.5b	73.94bc
I_4N_{40}	38.06bc	55.80bcd	8.07def	52.53d	40.95ab	76.02b
Significance level						
I	**	**	**	**	**	**
N	**	**	Ns	**	**	**
I × N	**	Ns	**	**	**	Ns

Note: N_1, N_2, and N_3: application of 0, 20 and 40 kg ha^{-1} as starter fertilizers, respectively. I_1: full irrigation; I_2: rainfed; I_3: one-time irrigation in the flowering stage (150 mm), I_4: two-time irrigation in the flowering and seed setting stages (250 mm). PE: plant height; RD: rooting depth; RNN: number of root nodules per plant; LCH: Chlorophyll content in leaves; CS: canopy spread; DFL: number of days from seed planting to 50% flowering. Ns: statistically insignificant; ** and *: significant at the 1% and 5% level, respectively

Примечание: N_1, N_2, N_3 – стартерные удобрения в дозировках 0, 20 и 40 кг/га соответственно. I_1 – полное орошение; I_2 – богара; I_3 – однократный полив в фазе цветения (150 мм); I_4 – двукратный полив в фазе цветения и завязывания семян (250 мм). PE – высота растений; RD – глубина укоренения; RNN – число корневых клубеньков на одно растение; LCH – содержание хлорофилла в листьях; CS – распространение полога; DFL – количество дней от посева до 50-процентного цветения. Ns – статистически недостоверно; ** и * – достоверно при уровнях 1% и 5% соответственно

ing (DF) and maturity (DM) were influenced by the main effects of irrigation and nitrogen. Consumption of 20 and 40 kg ha^{-1} of N delayed DF by 4.33 days and 7.34 days. Increasing the volume and frequency of irrigation also caused a significant increase in DF. I_1, I_3, and I_4 delayed DF by 18%, 13%, and 15%, respectively, compared to the rainfed conditions. The maximum length of the development period (DM) with the application of 40 and 20 kg of nitrogen under full irrigation conditions was recorded as 118 days (Table 2). Results showed that soil water deficit under rainfed conditions accelerated the maturity, and the lowest DM was recorded under $I_2 + N_0$ conditions (91 days). Applying supplemental irrigation I_3 and I_4 delayed DM by 10 and 13 days compared to rainfed conditions.

With the increase in the frequency of irrigation and the nitrogen dose, yield components, such as the number of grains per plant and the number of pods, increased. The highest grain yield was obtained by the application of N_{20} or N_{40}

Table 2. **Yield and water use efficiency in chickpea under different nitrogen doses and irrigation regimes in Western Iran**

Таблица 2. **Урожайность и эффективность использования воды в посевах нута при разных дозах азота и режимах орошения на западе Ирана**

Effect	DM	PPL	ABG	GY	WUE_G	WUE_B
Nitrogen						
N_0	103.97b	24.97c	3754.61b	1203.17b	2.43b	7.50b
N_{20}	107.00a	27.54b	4127.74a	1377.4a	2.79a	8.37a
N_{40}	109.08a	28.89a	4226.41a	1413.40a	2.86a	8.37a
Irrigation						
I_1	117.47a	33.90a	5584.22a	1807.09a	2.27c	7.04c
I_2	95.06d	20.86d	2525.88d	878.40d	3.27a	9.40a
I_3	105.37c	25.50c	3564.75c	1213.40c	2.70b	7.93b
I_4		28.26b	4470.14b	1426.42b	2.53b	7.94b
Combined						
I_1N_0	115.35ab	29.6c	4870.4c	1627.07b	2.00g	6.00g
I_1N_{20}	118.32a	34.8b	5796b	1903.41a	2.40ef	7.31ef
I_1N_{40}	118.75a	37.32a	6086.3a	1890.8a	2.42ef	7.81de
I_2N_0	90.89f	19.16h	2517.8h	872.6e	3.19ab	9.21ab
I_2N_{20}	96.36e	22.24g	2596.80h	856e	3.21ab	9.71a
I_2N_{40}	97.94e	21.19g	2463h	906.6e	3.41a	9.28a
I_3N_0	103.41d	24.4f	3250.4g	1061.8d	2.35ef	7.19f
I_3N_{20}	104.99d	24.8f	3532.8f	1237.4c	2.77cd	7.92d
I_3N_{40}	107.72cd	27.32de	3911e	1341c	2.98bc	8.69bc
I_4N_0	106.25d	26.72e	4379.8d	1251.2c	2.17fg	7.60def
I_4N_{20}	108.35cd	28.32cd	4585.3d	1512.8b	2.81cd	8.52c
I_4N_{40}	111.93bc	29.76c	4445.30d	1515.2b	2.62de	7.69def
Significance level						
I	**	**	**	**	**	**
N	**	**	**	**	**	**
I × N	Ns	**	**	*	*	**

Note: N_1, N_2, and N_3: application of 0, 20 and 40 kg ha^{-1} as starter fertilizers, respectively; I_1: full irrigation; I_2: rainfed; I_3: one-time irrigation in the flowering stage (150 mm); I_4: two-time irrigation in the flowering and seed setting stages (250 mm); DM: number of days from planting to maturity. PPL: number of pods per plant; ABG: aboveground biomass; GY: grain yield; WUE_G: grain–water use efficiency; WUE_B: biomass–water use efficiency. Ns: statistically insignificant; ** and * are significant at 1 and 5% level, respectively

Примечание: N_1, N_2, N_3 – стартерные удобрения в дозировках 0, 20 и 40 кг/га соответственно. I_1 – полное орошение; I_2 – богара; I_3 – однократный полив в фазе цветения (150 мм); I_4 – двукратный полив в фазе цветения и завязывания семян (250 мм); DM – количество дней от посева до созревания. PPL – количество бобов на растении; ABG – зеленая масса; GY – урожайность зерна; WUE_G – эффективность использования воды по зерну; WUE_B – эффективность использования воды по зеленой массе. Ns – статистически недостоверно; ** и * – достоверно при уровнях 1% и 5% соответственно

under I_1 conditions (1890 and 1903 kg ha^{-1}). The lowest seed yield was recorded under rainfed conditions (878.2 kg ha^{-1}). Under I_2 and I_3 conditions, nitrogen application had no significant effect on yield. Under I_4 conditions, using 20 and 40 kg ha^{-1} of N increased grain yield by 20% and 22% compared to the control condition (see Table 2). WUE_G increased with nitrogen application. However, no significant difference was observed between N_{20} and N_{40}. Examining this component between irrigation regimes showed that it significantly decreased with an increasing irrigation volume (Fig. 2). The highest value of WUE_G was recorded under rainfed conditions (3.27 kg mm^{-1} ha^{-1}) and the lowest value was recorded under full irrigation conditions (2.27 kg mm^{-1} ha^{-1}). It is interesting to note that one- and two-time supplemental irrigation increased the WUE by 19% and 11% compared to I_1. The lowest value of WUE_G was recorded under $I_1 + N_0$ conditions (2.27 kg mm^{-1} ha^{-1}).

A biplot analysis was used to explain the effect of treatment combinations and how traits are influenced by treatments (Fig. 5). The findings showed that the first component separated the optimal soil moisture conditions from other soil moisture regimes. In this analysis, the closeness of combined treatments to traits indicated their high effectiveness on mentioned traits. $I_1 + N_{20}$ and $I_1 + N_{40}$ caused the highest values of root nodule number, chlorophyll, pod number, seed number, biomass, days to flowering, days to maturity, and seed yield.

In the studied area, in addition to unfavorable soil conditions, the amount of monthly rainfall decreased significantly after April. However, it seems that in addition to the stress of nutrient deficiencies, the plants also faced the water shortage and heat stress at the end of the season. Nitrogen application significantly increased the characteristics related to vegetative growth. Consumption of 20 or 40 kg ha^{-1} of N increased

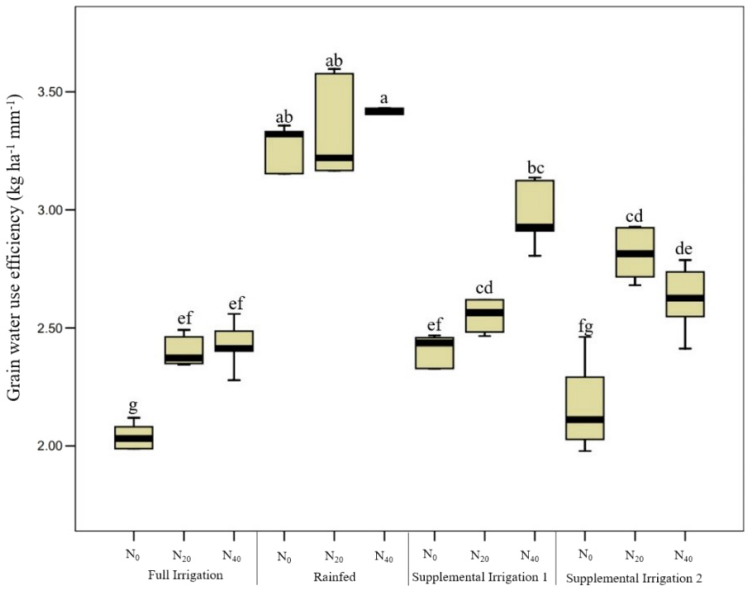


Fig. 2. Water use efficiency of chickpea plants under different doses of starter nitrogen (0, 20, and 40 kg ha^{-1}) and various soil moisture regimes in the semi-arid region

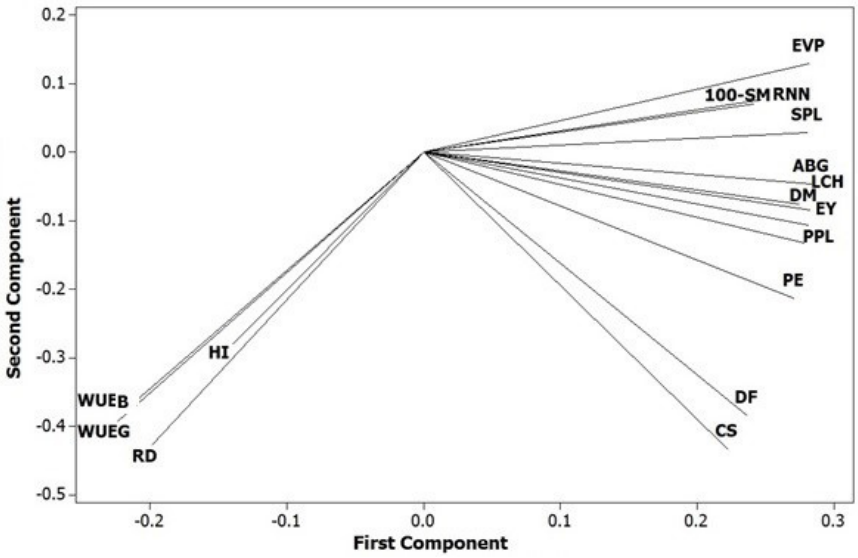
Рис. 2. Эффективность использования воды нутом в посевах в полузасушливом регионе в зависимости от различных доз стартового азота (0, 20 и 40 кг/га) при разных режимах полива

The correlation between traits is shown in Figure 3. Attributes that are close to each other and have sharp angles demonstrated a positive and significant correlation. The results indicated that dry biomass, chlorophyll, number of days to maturity, number of pods, number of grains per plant, and plant height positively correlated with grain yield. However, water consumption efficiency showed a significant correlation with rooting depth.

The clustering of treatment compounds in terms of similarity in affecting the assessed traits is shown in Figure 4. This clustering indicated that the effect of irrigation regimes was much stronger than nitrogen application. Cluster 1 included full irrigation treatments and different levels of nitrogen application. The highest vegetative growth and grain yield were obtained under the conditions of full irrigation and application of nitrogen fertilizers. Cluster 2 included supplemental irrigation treatments and different doses of nitrogen, which had average performance for most of the examined traits. Cluster 3 included the application of different doses of nitrogen under rainfed conditions, which showed the lowest values except WUE.

the longitudinal and lateral growth of the chickpea canopy compared to the control. This was associated with an increase in chlorophyll content. From the physiological point of view of source–sink relationships, such an expansion means increasing the photosynthetic area and supplying more photoassimilates to the growing or filling sink organs. This is while sink strength is defined as the ability of the sink organ to receive and transport photoassimilates produced in the process of photosynthesis (current photosynthesis) or photosynthetic products temporarily stored in the stem (remobilization). The sink strength depends on the photoassimilate pool sizes in sink cells and the physiological circumstances of the plant (Smith et al., 2018). In this study, it was found that the use of the supplemental irrigation during the flowering stage can have a positive and stimulating effect on the size and number of grain yield components. On the other hand, it seems that the use of nitrogen increased the sink strength to receive photoassimilates by affecting the physiological state of the plant and the ratio of phytohormones (Mu, Chen, 2021).

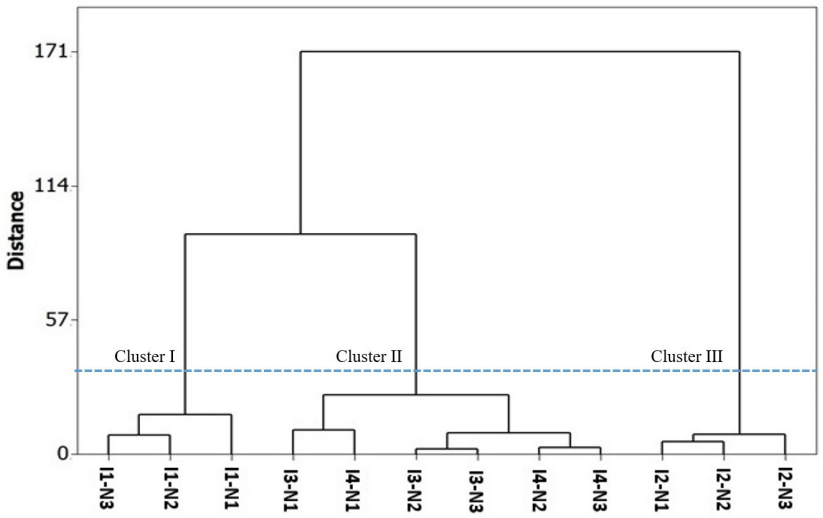
Also, the use of irrigation under rainfed conditions had a significant effect on the effectiveness of nitrogen, and the



A small angle indicates that the traits are positively correlated. 100-SM: 100-seed weight, SPL: seed number per plant; RNN: number of root nodules per plant; LCH: chlorophyll content in leaves; DM: number of days from planting to maturity; EY: grain yield; PPL: number of pods per plant; PE: plant height; DF: number of days from seed planting to 50% flowering; CS: canopy spread; RD: rooting depth; HI: harvest index; WUE_G: grain–water use efficiency; WUE_B: biomass–water use efficiency / Небольшой угол указывает на положительную корреляцию признаков. 100-SM – масса 100 семян; SPL – количество семян на растение; RNN – число корневых клубеньков на одно растение; LCH – содержание хлорофилла в листьях; DM – количество дней от посева до созревания; EY – урожайность зерна; PPL – количество бобов на растение; PE – высота растения; DF – количество дней от посева до 50-процентного цветения; CS – распространение полога; RD – глубина корней; HI – индекс урожая; WUE_G – эффективность использования воды по зерну; WUE_B – эффективность использования воды по зеленой массе

Fig. 3. Monoplot principal component analysis (PCA) for understanding the relationships between agronomic and morphophysiological variables of chickpea cultivated under different N fertilizer doses and irrigation regimes

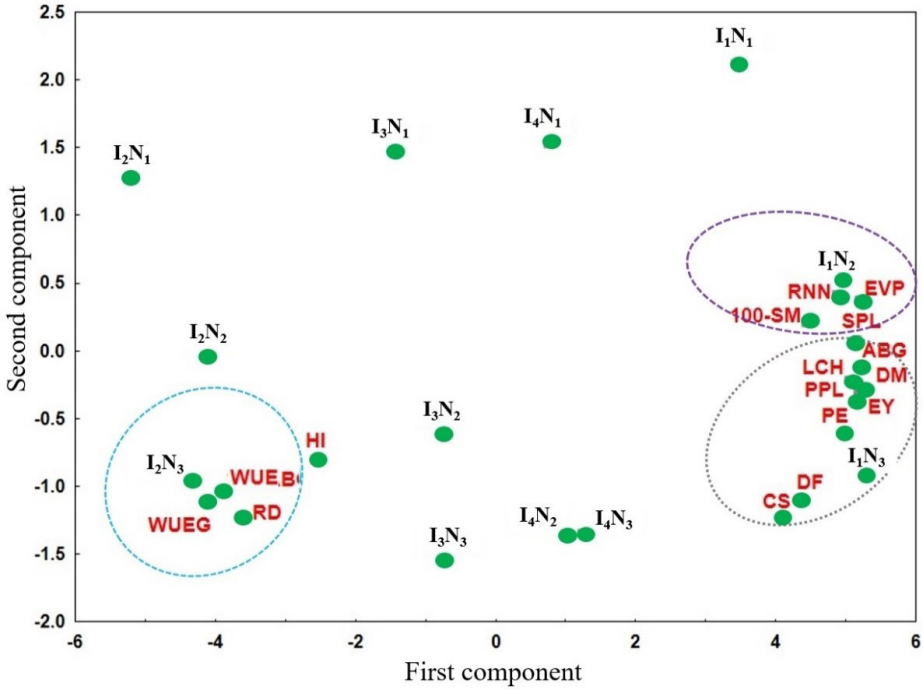
Рис. 3. Применение анализа главных компонент для понимания взаимосвязей между агрономическими и морфофизиологическими признаками нута, выращиваемого при различных дозах азотных удобрений и режимах орошения



N_1, N_2, and N_3 – 0, 20, and 40 kg ha^{-1}. I_1 – full irrigation; I_2 – rainfed; I_3 – supplemental irrigation in the flowering stage; I_4 – supplemental irrigation in the flowering and seed setting stages / N_1, N_2, N_3 – 0, 20 и 40 кг/га. I_1 – полное орошение; I_2 – богара; I_3 – дополнительное орошение в фазе цветения; I_4 – дополнительное орошение в фазе цветения и завязывания семян

Fig. 4. Classification of nitrogen doses × irrigation regimes combined treatments in terms of similarity in influencing the evaluated agronomic traits of chickpea grown in Western Iran

Рис. 4. Классификация комбинаций доз азота × режима орошения по сходству их влияния на оцениваемые агрономические признаки нута, выращиваемого на западе Ирана



Traits close to treatment compounds were most affected by those treatments. 100-SM: 100-seed weight; SPL: seed number per plant; RNN: number of root nodules per plant; LCH: chlorophyll content in upper leaves; DM: number of days from planting to maturity; EY: grain yield; PPL: number of pods per plant; PE: plant height; DF: number of days from seed planting to 50% flowering; CS: canopy spread; RD: rooting depth; HI: harvest index; WUE_G: grain–water use efficiency; WUE_B: biomass–water use efficiency. N_1, N_2, and N_3: 0, 20, and 40 kg ha^{-1}. I_1: full irrigation; I_2: rainfed; I_3: supplemental irrigation in the flowering stage (150 mm); I_4: supplementary irrigation in the flowering and seed setting stages (250 mm) / Признаки, близкие к способам выращивания посевов, были наиболее сильно затронуты проведенными обработками. 100-SM – масса 100 семян; SPL – количество семян на растение; RNN – число корневых клубеньков на одно растение; LCH – содержание хлорофилла в верхних листьях; DM – количество дней от посева до созревания; EY – урожайность зерна; PPL – количество бобов на растение; PE – высота растения; DF – количество дней от посадки семян до 50-процентного цветения; CS – распространение полога; RD – глубина корней; HI – индекс урожая; WUE_G – эффективность использования воды по зерну; WUE_B – эффективность использования воды по зеленой массе. N_1, N_2, N_3 – 0, 20 и 40 кг/га. I_1 – полное орошение; I_2 – богара; I_3 – дополнительное орошение в фазе цветения; I_4 – дополнительное орошение в фазе цветения и завязывания семян

Fig. 5. Principle component analysis for treatment compounds and cultivar traits evaluated in chickpea

Рис. 5. График анализа основных компонентов, построенный для совместного исследования взаимосвязей между различными способами выращивания посевов и оцененными признаками сортов нута

greatest effect of nitrogen was recorded under full irrigated conditions or supplementary irrigation. These results indicate that in the studied area, in addition to the sharp drop in rainfall at the end of the growing season, the soil moisture reserves were not enough to support the growth and production of economic and reasonable chickpeas. Previous studies also indicated that supplementary irrigation in the flowering stage greatly improved the efficiency of nitrogen used in wheat (Liu et al., 2022).

The amount of rainfall during the chickpea growing period was 210 mm and the annual precipitation was 473 mm. However, the amount of evapotranspiration during March–September in the region is estimated to be around 690 mm (Varvani et al., 2019). The mentioned data point to the fact that in the regional conditions under study, rainfed cultivation cannot be considered a suitable option for spring chickpeas. In the mentioned circumstances, irrigation regimes I_3 or I_4 with one- or two-time supplemental irrigations during the sensitive stages of reproduction could alleviate the effects of drought stress. This study confirmed our previous findings regarding the effectiveness of supplemental irrigation during the reproductive stages of chickpeas in the semi-arid region of Hamadan (Janmohammadi et al., 2024). In this experiment, by measuring the amount of water consumed, the soil moisture, and the amount of evapotranspiration, WUE was calculated based on seeds or biomass.

The use of nitrogen through the improvement of plant processes, such as the increase of pigments and the rate of photosynthesis, and the greater effect on the production of dry matter caused an increase in WUE. Those results were consistent with the reports of other researchers. In this regard, Bouras et al. (2023) reported that under low application of N fertilizer, WUE and nitrogen use efficiency increased in chickpea in a semi-arid region. However, the highest WUE was recorded under rainfed conditions. This is partially due to the activation of adaptive systems in the plant to prevent water wastage through transpiration and more optimal use of absorbed water. Under rainfed conditions, half-closing of the stomata, increasing the rooting depth, reducing the hydraulic resistance of the roots, increasing the facility of water transport in the vessels, better and more efficient absorption of the roots developed in the deep soil can improve WUE (Fernández-García et al., 2013).

The insignificant difference between the effects of 20 and 40 kg ha^{-1} of N on some evaluated agronomic traits can be attributed to the deficiency of other nutrients, such as sulfur,

phosphorus, or micronutrients, which prevented the full emergence of the effects of nitrogen. The main effects of a primary nutrient appear more in balanced nutritional environments and with optimal availability of secondary nutrients (Grzebisz et al., 2022). This refers to the existence of synergistic relationships among some nutrients. Therefore, the application of 20 kg ha^{-1} of starter nitrogen along with providing the minimum required soil moisture, especially during the reproductive period, can produce an acceptable economic performance.

Conclusion

Evaluations showed that the application of a nitrogen starter improved the rooting depth, increased the number of root nodules, enhanced the chlorophyll content, elongated vegetative growth period, and finally improved the seed yield and water consumption efficiency. However, in many cases, no significant difference was observed between the doses of 20 and 40 kg ha^{-1}. On the other hand, the effectiveness of nitrogen was strongly affected by soil moisture status. The highest positive and improving effect of nitrogen on the evaluated agronomic characteristics was recorded under the full irrigation conditions and two supplemental irrigations during the reproductive period. Our findings suggest that in order to achieve a reasonable economic performance of chickpeas, at least two supplemental irrigations and the use of starter nitrogenous fertilizers with amounts of 20 or 40 kg ha^{-1} should be included in dryland chickpea production systems.

References / Литература

Andrews M., Hodge S. Climate change, a challenge for cool season grain legume crop production. In: S.S. Yadav, D.L. McNeil, R. Redden, S.A. Patil (eds). *Climate Change and Management of Cool Season Grain Legume Crops*. Dordrecht: Springer; 2010. p.1-9. DOI: 10.1007/978-90-481-3709-1_1

Ayangbenro A.S., Babalola O.O. Reclamation of arid and semi-arid soils: The role of plant growth-promoting archaea and bacteria. *Current Plant Biology*. 2021;25:100173. DOI: 10.1016/j.cpb.2020.100173

Benitez-Alfonso Y., Soanes B.K., Zimba S., Sinanaj B., German L., Sharma V. et al. Enhancing climate change resilience in agricultural crops. *Current Biology*. 2023;33(23):1246-1261. DOI: 10.1016/j.cub.2023.10.028

Bouras F.Z., Hadjout S., Haddad B., Malek A., Aitmoumene S., Gueboub F. et al. The effect of nitrogen supply on water and nitrogen use efficiency by wheat–chickpea intercropping system under rain-fed Mediterranean conditions. *Agriculture*. 2023;13(2):338-345. DOI: 10.3390/agriculture13020338

Chauhan Y.S., Ryan M., Chandra S., Sadras V.O. Accounting for soil moisture improves prediction of flowering time in chickpea and wheat. *Scientific Reports*. 2019;9(1):7510. DOI: 10.1038/s41598-019-43848-6

Fernández-García P., López-Bellido L., Muñoz-Romero V., López-Bellido R.J. Chickpea water use efficiency as affected by tillage in rainfed Mediterranean conditions. *Agricultural Water Management*. 2013;129:194-199. DOI: 10.1016/j.agwat.2013.07.022

Galpottage Dona W.H., Schoenau J.J., King T. Effect of starter fertilizer in seed-row on emergence, biomass and nutrient uptake by six pulse crops grown under controlled environment conditions. *Journal of Plant Nutrition*. 2020;43(6):879-895. DOI: 10.1080/01904167.2020.1711945

Gopalakrishnan S., Srinivas V., Vemula A., Samineni S., Rathore A. Influence of diazotrophic bacteria on nodulation, nitrogen fixation, growth promotion and yield traits in five cultivars of chickpea. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2018;15:35-42. DOI: 10.1016/j.bcab.2018.05.006

Grzebisz W., Zielewicz W., Przygocka-Cyna K. Deficiencies of secondary nutrients in crop plants – A real challenge to improve nitrogen management. *Agronomy*. 2022;13(1):66. DOI: 10.3390/agronomy13010066

Janmohammadi M., Kouchakkhani H., Sabaghnia N. The effect of supplemental irrigation and exogenous application of glycine betaine on chickpea performance in the semi-arid region. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*. 2024;61(2):189-199. DOI: 10.20289/zfdergi.1402726

Karalija E., Vergata C., Basso M.F., Negussu M., Zaccai M., Grossi-de-Sa M.F. et al. Chickpeas' tolerance of drought and heat: Current knowledge and next steps. *Agronomy*. 2022;12(10):2248. DOI: 10.3390/agronomy12102248

Kheiri M., Kambouzia J., Deihimfard R., Yaghoubian I., Movahhed Moghaddam S. Response of rainfed chickpea yield to spatio-temporal variability in climate in the Northwest of Iran. *International Journal of Plant Production*. 2021;15(2):499-510. DOI: 10.1007/s42106-021-00153-5

Liu S., Lin X., Wang W., Zhang B., Wang D. Supplemental irrigation increases grain yield, water productivity, and nitrogen utilization efficiency by improving nitrogen nutrition status in winter wheat. *Agricultural Water Management*. 2022;264:107505. DOI: 10.1016/j.agwat.2022.107505

Mohammed A., Tana T., Singh P., Molla A. Modeling climate change impact on chickpea production and adaptation options in the semi-arid North-Eastern Ethiopia. *Journal of Agriculture and Environment for International Development*. 2016;110(2):377-395. DOI: 10.12895/jaeid.20162.510

Mu X., Chen Y. The physiological response of photosynthesis to nitrogen deficiency. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2021;158:76-82. DOI: 10.1016/j.plaphy.2020.11.019

Ouji A., El-Bok S., Mouelhi M., Ben Younes M., Kharrat M. Yield and yield components of chickpea (*Cicer arietinum* L.) as influenced by supplemental irrigation under semi-arid region of Tunisia. *World Journal of Agricultural Research*. 2016;4(5):153-157. DOI: 10.12691/wjar-4-5-5

Ryan J., Singh M., Pala M. Long-term cereal-based rotation trials in the Mediterranean region: Implications for cropping sustainability. *Advances in Agronomy*. 2008;97:273-319. DOI: 10.1016/S0065-2113(07)00007-7

Shamsi K., Kobraee S., Haghparast R. Drought stress mitigation using supplemental irrigation in rainfed chickpea (*Cicer arietinum* L.) varieties in Kermanshah, Iran. *African Journal of Biotechnology*. 2010;9(27):4197-4203.

Sharma S., Upadhyaya H.D., Roorkiwal M., Varshney R.K., Gowda C.L. Chickpea. In: M. Singh, H.D. Upadhyaya, I.S. Bisht (eds). *Genetic and Genomic Resources of Grain Legume Improvement*. London; Waltham, MA: Elsevier; 2013. p.81-111.

Smith M.R., Rao I.M., Merchant A. Source–sink relationships in crop plants and their influence on yield development and nutritional quality. *Frontiers in Plant Science*. 2018;9:1889. DOI: 10.3389/fpls.2018.01889

Varvani H., Farhadi B.B., Sharifi M.A. Integration of Landsat 8 satellite images and MODIS sensor to estimate actual crop evapotranspiration of maize during the growing period (case study: Mahidasht, Kermanshah province). *Iran – Water Resources Research*. 2019;15(1):257-266.

Zhang J., Wang J., Zhu C., Singh R.P., Chen W. Chickpea: Its origin, distribution, nutrition, benefits, breeding, and symbiotic relationship with *Mesorhizobium* species. *Plants*. 2024;13(3):429. DOI: 10.3390/plants13030429

Information about the authors

Hussein Hamadi Baqer Al-Allo, MSc, University of Maragheh, Amirkabir Hwy., Maragheh 83111-55181, Iran, alaloo.hussein@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-8351-2848

Mohsen Janmohammadi, PhD, Professor, University of Maragheh, Amirkabir Hwy., Maragheh 83111-55181, Iran, mjanmohammadi@maragheh.ac.ir, https://orcid.org/0000-0002-6121-6791

Mohsen Kheyrkhah, PhD, Member of the Scientific Faculty, Agriculture Organization of Qazvin Province, Felestin St., Qazvin 72M3+M82, Iran, kheyrkhah523@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-0492-7270

Naser Sabaghnia, PhD, Professor, University of Maragheh, Amirkabir Hwy., Maragheh 83111-55181, Iran, sabaghnia@maragheh.ac.ir, https://orcid.org/0000-0001-9690-6525

Информация об авторах

Хусейн Хамади Бакер Аль-Алло, магистр, Университет Мараге, 83111-55181 Иран, Мараге, шоссе Амиркабир, alaloo.hussein@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-8351-2848

Мохсен Джанмохаммади, доктор философии, профессор, Университет Мараге, 83111-55181 Иран, Мараге, шоссе Амиркабир, mjanmohammadi@maragheh.ac.ir, https://orcid.org/0000-0002-6121-6791

Мохсен Хейрха, доктор философии, член научного факультета, Сельскохозяйственная организация провинции Казвин, 72M3+M82 Иран, Казвин, ул. Фелестин, kheyrkhah523@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-0492-7270

Насер Сабагния, доктор философии, профессор, Университет Мараге, 83111-55181 Иран, Мараге, шоссе Амиркабир, sabaghnia@maragheh.ac.ir, https://orcid.org/0000-0001-9690-6525

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.
Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The article was submitted on 17.01.2025; approved after reviewing on 17.06.2025; accepted for publication on 11.08.2025.
Статья поступила в редакцию 17.01.2025; одобрена после рецензирования 17.06.2025; принята к публикации 11.08.2025.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 634.74
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-68-79

CC BY

Состояние и мировые тенденции выращивания сортов и селекционных форм различных видов актинидии

Р. О. Андреев[1], Н. В. Козак[2], С. Ю. Цюпка[1], В. А. Гончаренко[1], В. М. Горина[1]

[1] *Никитский ботанический сад – Национальный научный центр Российской академии наук, Ялта, Россия*

[2] *Федеральный научный селекционно-технологический центр садоводства и питомниководства, Москва, Россия*

Автор, ответственный за переписку: Валентина Милентьевна Горина, valgorina@yandex.ru

Целью исследований явилось изучение разнообразия культивируемых видов и сортов актинидии, оценка состояния и определение тенденций возделывания и использования различных видов актинидий для выявления возможности их выращивания в Крыму. Плоды *Actinidia chinensis* var. *deliciosa* (A. Chev.) A. Chev. (киви) относятся к наиболее ценным субтропическим плодовым растениям. Лидером среди основных регионов – производителей ее плодов является Азия (54,5%), значительное количество производят в Европе (24,1%) и Океании (14,4%). Самым крупным производителем киви является Китай, в 2023 г. в этой стране собрано 54,0% плодов от мирового производства. Также значительное количество плодов киви собирают в Италии, Новой Зеландии, несколько меньше – в Чили, Иране, Греции. До 1999 г. производство киви в мире составляло около одного миллиона тонн. С 2000 г. наблюдается его стабильный рост и увеличение площадей. В 2023 г. оно увеличилось по сравнению с 1993 г. в 4,9 раза, площади выросли в 4,8 раза. По данным ФАО, наблюдается значительный рост производства плодов *A. chinensis* var. *deliciosa*, а также появились тенденции по промышленному возделыванию насаждений *Actinidia kolomikta* (Maxim. et Rupr.) Maxim., *Actinidia arguta* (Siebold et Zucc.) Planch. ex Miq. и некоторых других видов рода *Actinidia* Lindl.
В Никитском ботаническом саду ведется селекционная работа по созданию наиболее адаптированных к условиям Крыма сортов *A. chinensis* var. *deliciosa* и был получен новый сорт ‘Никитская Юбилейная’. Создание новых сортов актинидий, предназначенных для наиболее благоприятных районов их выращивания, позволит расширить ассортимент и увеличить производство плодовой продукции в России.

Ключевые слова: *Actinidia* spp., площади возделывания, урожайность, производство плодов, сорта

Благодарности: исследования проводили в рамках государственного задания № FNNS-2022-0008 «Пополнить, изучить генофонд южных плодовых, орехоплодных и ягодных культур и на его базе создать новые сорта с комплексом хозяйственно ценных признаков для промышленного садоводства», порученного Никитскому ботаническому саду – Национальному научному центру РАН.
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Андреев Р.О., Козак Н.В., Цюпка С.Ю., Гончаренко В.А., Горина В.М. Состояние и мировые тенденции выращивания сортов и селекционных форм различных видов актинидии. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(3):68-79. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-68-79

© Андреев Р.О., Козак Н.В., Цюпка С.Ю., Гончаренко В.А., Горина В.М., 2025

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-68-79

Status and global trends in the cultivation of varieties and breeding forms of various *Actinidia* spp.

Roman O. Andreev[1], Natalia V. Kozak[2], Sergei Yu. Tsiupka[1], Vladimir A. Goncharenko[1], Valentina M. Gorina[1]

[1] *Nikita Botanical Gardens – National Research Center of the Russian Academy of Sciences, Yalta, Russia*

[2] *Federal Horticultural Center for Breeding, Agrotechnology and Nursery, Moscow, Russia*

Corresponding author: Valentina M. Gorina, valgorina@yandex.ru

The objective of the research was to study the diversity of cultivated species and varieties of *Actinidia* Lindl., assess the status and analyze the trends pertaining to the cultivation of various *Actinidia* spp. in order to find out whether it is possible to cultivate them in the Crimea. The fruits of *Actinidia chinensis* var. *deliciosa* (A. Chev.) A. Chev. (kiwi) are among the most valuable subtropical fruit plants. The leader among the main kiwifruit-producing regions is Asia (54.5%), and significant amounts are produced in Europe (24.1%) and Oceania (14.4%). The largest producer of kiwi is China; in 2023, this country harvested 54.0% of the global production. Besides, significant harvests are collected in Italy and New Zealand, and somewhat less in Chile, Iran, and Greece. Until 1999, the world production of kiwi was about one million tons. A steady production growth and the expansion of cultivation areas have been observed since 2000. In 2023, the production increased 4.9 times compared to 1994, and the area 4.8 times. FAO reported a significant increase in the production of *A. chinensis* var. *deliciosa* fruits, and new trends towards the cultivation of *A. kolomikta* (Maxim. et Rupr.) Maxim., *A. arguta* (Siebold **e**t Zucc.) Planch. ex Miq., and some other *Actinidia* spp.

The breeding work in the Nikita Botanical Gardens has been aimed at the development of cultivars of *A. chinensis* var. *deliciosa* that are most adapted to the conditions of the Crimea, and a new cultivar, 'Nikitskaya Yubileynaya', has been released. Producing new *Actinidia* cultivars acclimated to the most favorable areas for their cultivation will expand the range and increase the production of fruits in Russia.

Keywords: *Actinidia* spp., cultivation areas, yield, fruit production, cultivars

Acknowledgements: the research was carried out within the framework of the state task assigned to the Nikita Botanical Gardens – National Research Center of the RAS, Project No. FNNS-2022-0008 "Replenish and study the genetic diversity of southern fruit, nut and berry crops, and develop on its basis new cultivars with a set of valuable agronomic traits for industrial horticulture".

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Andreev R.O., Kozak N.V., Tsiupka S.Yu., Goncharenko V.A., Gorina V.M. Status and global trends in the cultivation of varieties and breeding forms of various *Actinidia* spp. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(3):68-79. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-68-79

Введение

Современное садоводство должно базироваться на эффективных технологиях производства плодов, на сортах, обеспечивающих стабильность плодоношения и высокое качество плодовой продукции. Конкурентоспособность производства продукции достигается созданием насаждений плодовых и ягодных культур с учетом почвенно-климатических условий возделывания и их породно-сортовых особенностей (Popova, 2011). Для более эффективного развития этой отрасли сельского хозяйства необходимо расширение видового состава и сортимента плодовых растений путем интродукции, селекции и внедрения в производство новых культур.

По данным ФАО ООН, в мире выращивается около 100 промышленных плодовых, ягодных и орехоплодных культур. Среди плодовых самыми распространенными культурами являются кофе, маслина, яблоня, груша, финиковая пальма, банан и др. (http://www.fao.org/faostat/ru). Причем одной из наиболее распространенных считается маслина европейская, которая превосходит основные плодовые культуры, такие как апельсин, яблоня, груша, абрикос, персик, нектарин, и уступает только кофе (Tsiupka, 2019).

В мире существует много различных видов растений, но среди них имеется очень полезная для человека ягодная культура – актинидия (Plekhanova, 1990; Sobolev, 2010; Molkanova et al., 2014; Sedov, Gruner, 2014**)**. Актинидия китайская в диком виде растет в Западном и Центральном Китае, в бассейне реки Янцзы. До введения в культуру актинидию китайскую называли «янг-тао», или «китайский крыжовник» (Nut-bearing and subtropical…, 2012). Род Актинидия (*Actinidia* Lindl.) относится к семейству Актинидиевые (Actinidiaceae Hutch.) и объединяет около 70 видов, произрастающих в субтропических, тропических и частично – умеренных широтах мира.

Древесные лианы рода *Actinidia* используют как декоративные и плодовые растения, они долговечны, урожайны и неприхотливы. Более десяти видов этого рода обладают съедобными плодами и пользуются спросом у населения. В мире наиболее известна актинидия китайская (*A. chinensis* Planch.), которая, попав в Новую Зеландию, была введена в культуру под названием «киви» (green kiwi, fuzzy kiwifruit). Мировое производство актинидии (киви) на сегодняшний день составляет около 0,62% от общего производства основных плодовых культур (Krakhmaleva et al., 2023).

Крупноплодные сорта киви с зеленой мякотью плодов к середине прошлого века были официально описаны О. Шевалье как *A. latifolia* var. *deliciosa* A. Chev., а позднее он пересмотрел таксономию и перевел выделенную разновидность var. *deliciosa* в другой вид – *A. chinensis* var. *deliciosa* (A. Chev.) A. Chev. Китайский ботаник Чжоу Фэнь Лян был не знаком с работами А. Шевалье, поэтому спустя 30 лет он описал эту же разновидность под названием *A. chinensis* var. *hispida* C.F. Liang, но без указания номенклатурного типа, что является нарушением правил Международного кодекса ботанической номенклатуры и делает данную номенклатурную комбинацию невалидной. Еще позднее он же совместно с Алланом Россом Фергюсоном исправляют невалидное название и повышают ранг разновидности до уровня самостоятельного вида – актинидия деликатесная *A. deliciosa* (A. Chev.) C.F. Liang & A.R. Ferguson (Liang, Ferguson, 1984).

До настоящего времени существуют разные взгляды на объем вида актинидии китайской. Одни авторы признают самостоятельность вида *A. deliciosa*, однако во «Флоре Китая» (http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=2&taxon_id=200013894) вид *A. chinensis* рассматривается в широком смысле: в его составе, кроме типовой разновидности *A. chinensis* var. *chinensis*, выделяются еще две – *A. chinensis* var. *setosa* H.L. Li (тайваньский киви) и *A. chinensis* var. *deliciosa.* Разновидность *A. chinensis* var. *chinensis* характеризуется более гладкой кожицей (практически неопушенной), цветом мякоти от ярко-зеленого до ярко-желтого и более сладким и ароматным вкусом плодов. Сорта с желтой мякотью плодов (золотое киви, Zespri Gold, SunGold) имеют высокую рыночную цену и пригодны для употребления в пищу без очистки от кожицы.

A. chinensis var. *deliciosa* (киви) стала широко культивироваться во многих странах мира. Плоды киви – один из самых продаваемых фруктов на международном рынке, обладающий высокой пищевой и лечебной ценностью. Они считаются прекрасным диетическим продуктом, полезным для здоровья человека, обладают слабительным действием, противодиабетическими и противовоспалительными свойствами, проявляют противомикробную активность и защищают сердечно-сосудистую систему человека (Abe et al., 2010; Chang et al., 2010; Giangrieco et al., 2016). Все это обусловлено биологически активными компонентами, присутствующими в киви. Самым известным биологически активным соединением в плодах киви является витамин С, содержание которого в некоторых сортах может достигать 420 мг/100 г, что намного выше, чем в других фруктах. По количеству витамина С эта культура существенно превосходит ананасы, бананы, апельсины и лимоны. Плоды киви содержат также большое количество витаминов Е, РР и особенно группы В (B_1, B_2, B_6). Кроме того, плоды киви богаты полифенолами, которые обладают антиоксидантной активностью и способствуют укреплению здоровья человека (Nishiyama et al., 2004; Du et al., 2009). Также они являются хорошим источником минеральных элементов, таких как Fe, Zn, Cu, Se и Cr (Santoni et al.,2014; Latocha et al., 2015). Кроме того, в плодах киви содержится специфическое вещество актинидин, которое действует на организм человека аналогично ферменту папаину, получаемому из тропического дынного дерева (Nut-bearing and subtropical…, 2012). Помимо употребления плодов киви в свежем виде, популярны многочисленные продукты из киви, такие как сок киви, уксус, сушеные ломтики, джем, вино, йогурт и желе. Выявлено, что плоды киви, сок, вино и уксус из ее плодов богаты витамином С и полифенолами, они обладают высокой биологической активностью, тогда как сушеные ломтики киви и джем содержат большее количество минеральных элементов (Giangrieco et al., 2016). Плоды киви отличаются нежным приятным ароматом, их можно также использовать для заморозки, сушки, изготовления пастилы, киселей, пасты, мармелада, варенья, сиропов, цукатов и т. д. Съедобные плоды широко используются в различных отраслях пищевой промышленности, особенно консервной и винодельческой. Цветы и плоды актинидии также являются перспективным сырьем для косметической промышленности (Zakharenko, 2010; Park et al., 2013; Kozak et al., 2020; Kim et al., 2023). Различные части растений – листья, лозы, корни и особенно плоды – содержат множество видов биологически активных соединений, таких как тритерпеноиды, полифенолы, витамин С, углеводы, аминокислоты и минералы, поэтому их используют в традиционной медицине и в качестве фармацевтического сырья в народной медицине (Abe et al., 2010; Chang et al., 2010;

Ciacci et al., 2017; Li et al., 2018; Ma et al., 2021; Panishcheva et al., 2021). Стоимость продаваемых на мировом рынке плодов киви занимает шестое место после цитрусовых, яблок, груш и персиков (Zehra et al., 2020). Сочетание лечебных, диетических и вкусовых свойств ягод *A. chinensis* var. *deliciosa* способствовало быстрому ее распространению в субтропических регионах земли (Klemeshova, 2012).

В России официально актинидия известна с 1879 г. В лесах Дальнего Востока встречаются четыре вида актинидий: актинидия аргута, или острозубчатая (*A. arguta* (Siebold et Zucc.) Planch. ex Miq.), актинидия коломикта (*A. kolomikta* (Maxim. et Rupr.) Maxim.), актинидия полигамная, или носатая (*A. polygama* (Siebold et Zucc.) Maxim.), и актинидия Джиральди (*A. giraldii* Diels.). В Хабаровском крае и Амурской области лианы этих растений занимают площади более 100 тыс. га и дают урожай до 1000 т ягод. Население этого края уже много лет использует плоды актинидии для пищевых и лечебных целей (Plekhanova, Kolbasina, 1999; Vitkovsky, 2003).

В 1988 г. на Адлерской опытной станции (г. Сочи) были высажены растения *A. chinensis* var. *deliciosa* на площади 5,5 га, которые показали перспективность ее возделывания на Черноморском побережье и в некоторых, более северных районах Краснодарского края (Tarasenko, 1999).

В связи с изменением климата и увеличивающимся спросом на плоды актинидии возникла потребность в анализе состояния ее производства. Поэтому исследования, направленные на выявление соответствия биологических особенностей данной культуры метеоусловиям Крымского полуострова, весьма актуальны и расширение сортимента киви для Крыма также актуально.

Цель исследования – изучение разнообразия культивируемых видов и сортов актинидии, оценка состояния и определение тенденций возделывания и использования для выявления возможности их выращивания в Крыму.

Методология исследования

В исследование включены показатели мирового производства плодов актинидии (урожайность, занимаемая площадь, общий сбор плодов) и динамика их изменений. Представлен анализ данных официальных сайтов FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (Statistics Division) – Отдел статистики Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН, (статистический отчет от 23 апреля 2025 г.) (http://www.fao.org/faostat/ru). Также проанализированы данные сайта Госсорткомиссии – Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию (https://gossortrf.ru/registry) – и статистические отчеты за период 1993–2023 гг.

Результаты исследования и обсуждение

На основании исследуемых источников литературы отмечено, что наиболее широкое распространение в мире получила актинидия деликатесная, или сладкая (*A. chinensis* var. *deliciosa*), с коммерческим названием «киви» (kiwi, kiwifruit). В течение многих лет киви была любительской культурой. И только в 30-е годы прошлого столетия она стала приносить большие прибыли и быстро распространилась по миру (Goroshko, 1992). Высокие вкусовые качества плодов, стабильная урожайность, быстрое вступление растений в плодоношение, долговечность, устойчивость их к вредителям и болезням способствуют повышению спроса на плоды киви. Эта культура возделывается во многих странах мира, особенно с субтропическим климатом. В промышленных объемах ее плоды выращивают в Новой Зеландии, Калифорнии и Флориде (США), в Китае, Италии, Чили и других странах. Известно более 30 сортов этой культуры (http://www.liveinternet.ru/users/lviza_neo/post125503850). Для выращивания киви необходима сумма активных температур от 3500°С до 4500°С. Растения актинидии деликатесной характеризуются многолетним плодоношением (до 40 и более лет). Ее плоды более транспортабельны, чем у большинства плодовых и ягодных культур. Однако морозостойкость ее растений невысокая и находится в пределах –15…–16°С, что ограничивает распространение (Goroshko, 1992; Besedina et al., 2019).

Лидером среди основных регионов – производителей плодов киви является Азия (54,5%), значительное количество также производят в Европе (24,1%). Небольшие сборы осуществляются в Океании (14,4%) и Америке (7,0%) (рис. 1).

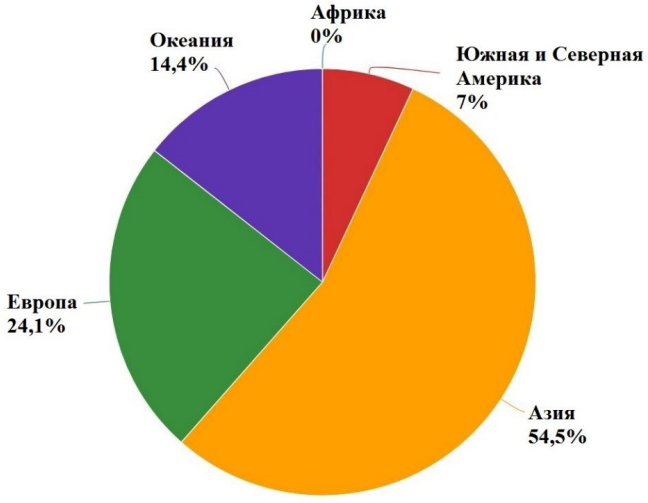


Рис. 1. Объем производства плодов киви по регионам, 1993–2023 гг.
Fig. 1. Kiwifruit production volumes by regions, 1993–2023

Насаждения киви в мире занимают 286,3 тыс. га, валовый сбор составляет 4,4 млн тонн, но спрос продолжает опережать производство плодов. Производство киви в 2023 г. увеличилось по сравнению с объемом 1993 г. в 4,9 раза, площади увеличились в 4,8 раз. Самым крупным производителем плодов киви является Китай. В 2023 г. в этой стране собрано 54,0% урожая плодов от мирового производства.

Выращивание киви в Китае началось в начале 1980-х годов, и первоначальная площадь посадки сорта 'Hayward' из Новой Зеландии составляла менее 1 га. К 2020 г. площадь насаждений различных сортов киви уже составила около 290 тыс. га, а годовой объем производства – более 3,2 млн т. В течение последних 42 лет в Китае было создано 156 новых сортов. Среди них выделены восемь сортов: 'Hongyang', 'Xuxiang', 'Cuixiang', 'Donghong', 'Guichang', 'Jinyan', 'Miliang 1', 'Jintao', которые высажены на площади более 6,7 тыс. га. В возделываемых сортах выявлены образцы с зеленой, желтой и красной мякотью.

Кроме *A. chinensis* var. *deliciosa* в Китае стали выращивать сорта *A. arguta* и *A. eriantha* Benth. Их насаждения в настоящее время занимают 1,77% от общей площади. Практически все плоды (99,73%) киви китайского производства потребляются внутри страны, но и ежегодный их импорт в Китай постоянно увеличивается. (Zhong et al., 2022).

Также значительное количество плодов киви собирают в Италии, Новой Зеландии, несколько меньше – в Иране, Чили, Греции и в небольшом количестве – во Франции, Японии, Турции и США (рис. 2).

Производство киви в Новой Зеландии в настоящее время находится на третьем месте. Ее плоды созревают в мае, а с июня по декабрь их экспортируют в Германию, Нидерланды, Францию, Швецию и другие страны. Растения обладают хорошей урожайностью, плоды могут храниться в течение 5–6 месяцев. Выращивают в основном сорт 'Hayward', но имеются насаждения и с такими сортами, как 'Abbot', 'Allison', 'Bruno', 'Chico', 'Greensill', 'Monty' и другие (Vitkovsky, 2003). Изменение климата может оказать влияние на пригодность тех или иных районов для выращивания киви в Новой Зеландии. Успех ее возделывания определяется достаточной осенней и зимней прохладой во время цветения, что может быть ограничением в условиях потепления климата. Разработали модели оценки пригодности мест для возделывания данной культуры, что поможет сформировать программы по селекции киви в этой стране (Vetharaniam et al., 2022).

На севере Ирана плоды киви с красной мякотью, выращенные в регионе с большей высотой и прохладными летними температурами, обладают более высоким содержанием в них аскорбиновой кислоты, общим содержанием фенолов и антиоксидантной активностью. Отмечено, что 1,1-дифенил-2-пикрилгидразил и антиоксидантная способность положительно коррелируют с аскорбиновой кислотой в плодах (r = 0,98) и общим содержанием фенолов (r = 0,94 и r = 0,93 соответственно). Общее содержание антоцианов положительно коррелирует с содержанием растворимых сухих веществ (r = 0,82), общим количеством растворимых сахаров (r = 0,94), pH (r = 0,94), отношением растворимых сухих веществ к титруемой кислоте (r = 0,83) и отрицательно – с количеством титруемой кислоты (r = –0,77) (Asadi et al., 2024).

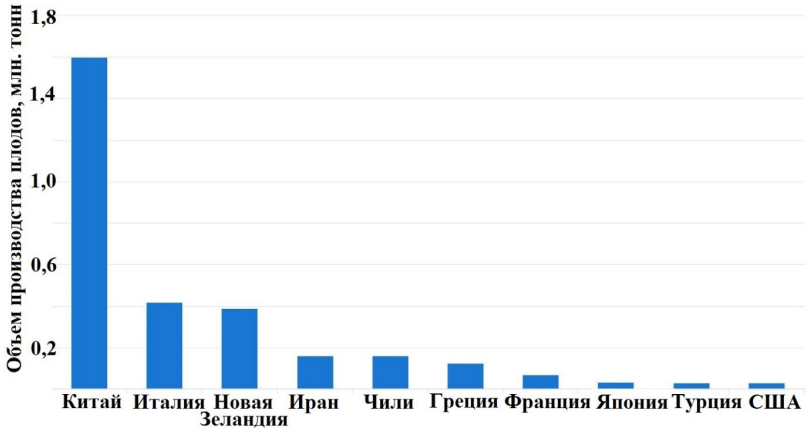


Рис. 2. Основные страны – производители плодов киви, 1993–2023 гг.
Fig. 2. The world's main kiwifruit producers, 1993–2023

В Италии эту культуру выращивают с 1972 г. В регионе Эмилия-Романья возделывают сорта 'Abbot', 'Bruno', 'Hayward', 'Monty'. Их плоды, массой до 94 г, прекрасно хранятся (до шести месяцев) и обычно экспортируются в другие страны. По производству плодов киви Италия уступает только Китаю (Vitkovsky, 2003; Costa, Testolin, 2022). В последние годы в Италии приобрела популярность *A. arguta*, которую называют выносливым киви. На севере Италии в регионе Пьемонт выращивают плоды *A. arguta* сорта 'Hortgem Rua'®, продаваемого под брендом Nergi®. Спелые плоды этого вида актинидии не требуют очищения от кожицы. Они также характеризуются богатым химическим составом, превосходящим таковой у киви (*A. chinensis* var. *deliciosa*) с зеленой мякотью плодов. (Brondino et al., 2022).

Киви в Румынии является новым видом фруктов, и внедрение зимостойких генотипов, адаптированных к местному умеренно суровому климату, представляет собой приоритетную задачу. *A. arguta* является более морозостойкой, чем *A. chinensis*. Она была первым видом, включенным в румынско-итальянскую программу по селекции киви, начатую в 1993 г. В Италии путем скрещивания трех разных сортов *A. arguta* – 'Francesca', 'Rosana', 'Jumbo' – получены сеянцы (1000 шт.). После их изучения отобрали восемь перспективных женских растений. На два элитных сорта *A. arguta* 'Vip Green' и 'Vip Red' получены патенты. У 'Vip Green' плоды очень крупные (более 15 г), цилиндрические, слегка плоские, асимметричные,

с зеленой мякотью и кожицей; у 'Vip Red' – среднего размера (около 10 г), с формой усеченного конуса и более узкой частью у чашечки, с красной мякотью и кожицей. Оба сорта имеют хорошую продуктивность и устойчивы к корневому раку. Плоды могут храниться более четырех месяцев (Stănică et al., 2022).

С 1977 г. актинидию деликатесную культивируют в Греции, где промышленные площади насаждений занимают до 1,3 тыс. га. Возделывают киви и во Франции. Основными сортами являются 'Abbot', 'Bruno', 'Hayward', 'Monty', опылителями служат сорта 'Matua', 'Tomury', 'Malde Semis'. Плоды в основном экспортируют в Бельгию, Германию, Данию, Нидерланды, Норвегию и т. д. В США *A. chinensis* var. *deliciosa* культивируют в штате Калифорния. В настоящее время насаждения киви сосредоточены в долинах Сакраменто и Сан-Хоакин этого региона.

В Японии первые насаждения киви заложены в 1972 г. Основные площади сосредоточены на островах Хонсю и Кюсю. Выращивают в основном сорта 'Abbot', 'Bruno', 'Hayward' (Goroshko, 1992; Vitkovsky, 2003). Повышение температуры воздуха в последние годы из-за глобального изменения климата отрицательно сказывается на производстве киви в Японии. Сорта группы Sanuki Kiwicco представляют собой межвидовые гибриды между *A. rufa* (Siebold et Zucc.) Planch. ex Miq., произрастающей в теплых регионах Японии, и диплоидной *A. chinensis* var. *chinensis*. Определено, что устойчивость *A. rufa* к высоким температурам передается потомству, и этот вид является ценным материалом для селекции сортов киви, адаптированных к более теплым климатическим условиям. В полевых условиях жарких летних периодов листья киви *A. chinensis* var. *deliciosa* сильно страдают от высоких температур воздуха. В то же время листья *A. rufa* не повреждаются, а сорта, полученные в результате межвидовой гибридизации ('Kagawa UP-Ki 4' и 'Kagawa UP-Ki 5'), повреждаются незначительно (Kataoka et al., 2022).

В последние годы киви получила популярность и стала активно возделываться в Турции. Однако почти на всех плантациях используется только один сорт *A. chinensis* var. *deliciosa* – 'Hayward'. В 2008 г. была начата программа селекции этой культуры. Отобраны и зарегистрированы по одному перспективному кандидату в сорта мужского и женского типа. В настоящее время продолжаются процедуры регистрации еще двух кандидатов в сорта мужского типа и двух – женского типа (Kahraman et al., 2022). В Турции, помимо употребления плодов киви в свежем виде, возникла необходимость их переработки и хранения. Разработан метод для использования некондиционных плодов киви, продаваемых в свежем виде по более низким ценам. Плоды киви сорта 'Hayward' очищали, нарезали ломтиками (толщиной 9 мм) и пропитывали сахарозой. После этого их сушили при температуре 42°C и через 12 месяцев определяли срок годности. Установили, что ломтики плодов киви сохраняют свой яркий зеленый цвет и качественные характеристики в течение девяти месяцев после сушки до пониженного содержания воды. Такие фрукты были рекомендованы к употреблению (Göksel et al., 2022). В 2017–2019 гг. в условиях Ордуского района Турции выявляли биологические особенности четырех сортов киви. Для этого региона были рекомендованы сорта 'Hayward' и 'Monty', которые выделяются крупными плодами и высокой урожайностью (İslam et al., 2022).

Киви становится одной из самых важных культур в Южной Африке. Недостаток знаний об оптимальной стадии зрелости южноафриканских сортов приводит к смешанной уборке урожая и потере послеуборочного качества плодов. Плоды двух сортов золотых киви ('Y368' и 'Сорели') были собраны в Ричмонде (Квазулу-Натал, Южная Африка) в ранние, средние и поздние сроки. Определили, что время сбора оказало значительное влияние ($P < 0,001$) на все параметры их качества. Известно, что 6,2% растворимых сухих веществ по шкале Брикса уже давно используется в индустрии киви как показатель оптимального значения для сбора урожая. Плоды, собранные в средние сроки при 6–7% Brix, также имели хорошие послеуборочные характеристики и сохраняли твердость в конце хранения и в течение срока годности продукции (Mahlaba et al., 2022).

В Корее плоды *A. eriantha* называют «Бидан», и они являются превосходной функциональной пищей. Плоды «Бидан» удобны для употребления, так как их кожица легко снимается при созревании. Учитывая урожайность качественных плодов и трудозатраты на прореживание плодов, на коммерческой ферме в Хэнаме (Корея) лучшим оказался вариант с 2-кратным опылением при 30 и 80% полного цветения растений, который был предложен для коммерческого производства плодов *A. eriantha* (Cho et al., 2022).

Широкое внедрение в сельскохозяйственное производство актинидии как культуры обусловлено отсутствием периодичности в плодоношении, высокими урожаями, длительным сроком промышленной эксплуатации насаждений, высокими ценами на плоды, поскольку в большинстве случаев они являются экологически чистыми. До 1999 г. производство плодов киви в мире составляло около одного млн т. Однако к 2000 г. интерес к этой культуре значительно возрос. С этого периода и по настоящее время наблюдается увеличение площадей под насаждениями киви, а внедрение более интенсивных технологий по ее выращиванию и новых сортов способствовало стабильному росту производства (рис. 3).

В регионах России с умеренным климатом успешно выращиваются менее теплолюбивые дальневосточные отечественные виды актинидии, отличающиеся некрупными плодами с тонкой съедобной кожицей: *A. arguta*, *A. kolomikta* и *A. polygama*. По вкусовым качествам и пищевой ценности плоды отечественных видов актинидии не уступают и часто превосходят киви. В состав плодов актинидий входят биологически активные вещества: витамины, катехины, биофлавоноиды, минеральные компоненты, полисахариды, аминокислоты, дубильные веществ и др. (Kolbasina, 2000; Motyleva et al., 2018; Vdovenko-Martynova et al., 2021).

Плоды актинидий этих видов употребляют в свежем и переработанном виде. Из плодов различных видов актинидий готовят варенье, пастилу, их используют для приготовления сока, вина, киселей, мармелада, цукатов. Плоды сушат, вялят, замораживают (Kozak et al., 2020). В России в основном распространены сорта и селекционные формы *A. kolomikta* и *A. arguta*. Селекционная работа с дальневосточными видами актинидии в России была начата И. В. Мичуриным в 1906 г. в Тамбовской области. Он отобрал среди сеянцев *A. arguta* сорта 'Урожайная', 'Ранняя', 'Поздняя'. В третьем и четвертом поколениях дикорастущей *A. kolomikta* им были выявлены формы, которые известны до настоящего времени как сорта 'Ананасная' и 'Клара Цеткин'. На Павловской опытной станции ВИР, используя такие же методы, Ф. К. Тетерев вывел зимостойкие крупноплодные сорта: 'Павловская', 'Крупноплодная', 'ВИР 1', 'Ленинградская Поздняя' и др. (Plekhanova, 2004).

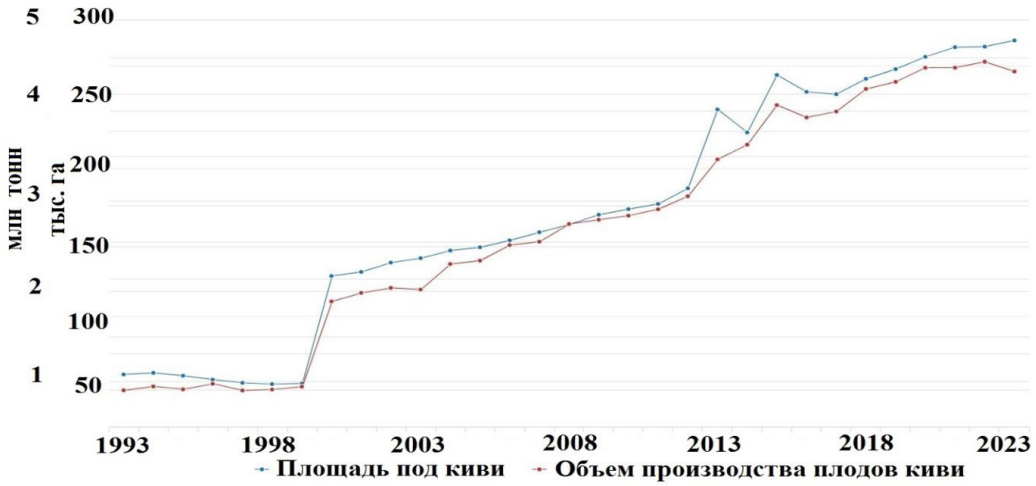


Рис. 3. Мировое производство и площади под насаждениями киви, 1993–2023 гг.
Fig. 3. Worldwide kiwi production and area under its plantations, 1993–2023

Большой вклад по введению дальневосточных видов актинидий (*A. arguta*, *A. kolomikta*, *A. polygama*) в культуру внесла Э. И. Колбасина. С 1969 г. она стала формировать коллекцию различных видов актинидии в Московском отделении ВНИИ растениеводства им. Н.И. Вавилова (МОВИР). В 60-е годы прошлого столетия Э. И. Колбасиной были собраны семена образцов дикорастущих форм в природных местообитаниях Приморья, о. Сахалина, Курильских островов и окультуренных растений в Центрально-Черноземной зоне, Нечерноземье и на Украине, что послужило основой создания генофондовой коллекции этой культуры в п. Михнево Московской области. Она является автором таких сортов актинидии, как 'Вафельная', 'Монетка', 'Сорока', 'Лакомка', 'Кавалер' (*A. kolomikta*); 'Приморская' (*A. arguta*); 'Абрикосовая' (*A. polygama*) и др. (Kolbasina, 1996; Plekhanova, 2004). Была разработана методика сортоизучения актинидии. При этом сорта необходимо группировать по их видовой принадлежности. Основные наблюдения должны проводиться за общим состоянием растений, их устойчивостью к низким отрицательным температурам воздуха, засухе, основным болезням и вредителям; также необходимо изучать сроки наступления основных фаз вегетации, степень самоплодности растений, их урожайность и качество ягод (Plekhanova, Kolbasina, 1999). Особое внимание при закладке насаждений указанных выше видов актинидии следует обращать на выбор участка: необходимо выбирать участки с хорошей освещенностью и защищенностью от господствующих ветров, с хорошо структурированной плодородной и влажной почвой. При годовой сумме осадков менее 450 мм необходимо искусственное орошение растений (Plekhanova, Kolbasina, 1999). На Павловской опытной станции ВИР М. Н. Плехановой была собрана коллекция актинидии. Ряд сортов создан сотрудниками Дальневосточной опытной станции ВИР О. Т. Слободчиковой и П. А. Чебукиным, а также в Самарском НИИ садоводства и лекарственных растений «Жигулевские сады» Г. И. Соболевым.

В настоящее время в Федеральном научном селекционно-технологическом центре садоводства и питомниководства (ФНЦ Садоводства) сконцентрирована самая представительная в России коллекция актинидии, которая насчитывает около 200 образцов (Kozak et al., 2020). В этом учреждении учениками Э. И. Колбасиной активно проводится селекционная работа. Были созданы новые зимостойкие сорта *A. polygama*: 'Красная Девица' с женским типом цветка и сорт-опылитель 'Добрый Молодец'. Они рекомендуются для выращивания в средней полосе России и ее южных регионах. Кроме того, листья сорта 'Добрый Молодец', характеризующиеся высоким содержанием хлорофиллов (1,8 мг/г), каротиноидов (0,6 мг/г) и аскорбиновой кислоты (690 мг/100 г), предлагается использовать в качестве источника биологически активных веществ для питания человека (Kozak et al., 2018).

Спрос на натуральные продукты, богатые биологически активными веществами, постоянно растет. Изучение химического состава плодов двух видов актинидии позволило выделить два сорта *A. kolomikta* с лучшими показателями: 'Чемпион' и 'Лакомка', а также два сорта *A. polygama*: 'Целебная' и 'Узорчатая'. Выявлена положительная корреляция между антиоксидантной активностью и содержанием полифенолов (Panishcheva et al., 2021). С участием отобранных в новых для произрастания условиях форм актинидии в ФНЦ Садоводства созданы и включены с 2013 по 2023 г. в Госреестр 13 новых сортов, защищенных патентами РФ: пять сортов *A. kolomikta* ('Надежда', 'Памяти Колбасиной', 'Услада', 'Чемпион', 'Элла'), шесть сортов *A. arguta* ('Дачная', 'Натэлла', 'Солнечный', 'Таежный Дар', 'Горянка', 'Патриция'), два – *A. polygama* ('Добрый Молодец', 'Красная Девица'). Эти сорта используются в любительских садах во всех регионах России, однако о создании производственных плантаций зимостойких актинидий в нашей стране сведений пока не имеется (Kozak et al., 2020).

Во влажных субтропиках России выращивают киви (*A. chinensis* var. *deliciosa*) пяти сортов женского типа: 'Abbot', 'Allison', 'Bruno', 'Monty', 'Hayward' и двух – мужского: 'Matua' и 'Tomury'. Установлено, что в этих условиях для актинидии деликатесной лимитирующими факторами во время цветения являются осадки и влажность воздуха. Выявлена критическая температура, ограничивающая ареал ее выращивания: –15…–18°С. Эффективное культивирование актинидии деликатесной во влажной субтропической зоне России в настоящее время возможно на основе микрорайонирования. В предгорьях (до 200 м н. у. м.) наиболее приспособлены сорта 'Hayward', 'Hayward К-10', 'Hayward К-17' и 'Kiwaldi', к низкогорьям – 'Hayward К' и 'Hayward К-8'. Для растений актинидии де-

ликатесной в исследуемой зоне необходим полив (Besedina et al., 2016, 2019; Tutberidze et al., 2016).

В условиях влажных субтропиков установлена специфика влияния климатических факторов на урожайность интродуцированных сортов *A. chinensis* var. *deliciosa*. Разработанные математические модели формирования урожаев исследуемых сортов позволяют прогнозировать урожай этой культуры. Взаимосвязь урожайности сортов 'Hayward К', 'Hayward К-12', 'Hayward К-17' с климатическими факторами влажных субтропиков России свидетельствует об их адаптивности к условиям данной зоны. Основным лимитирующим фактором возделывания киви, помимо суммы осадков в фазу цветения, являются сроки сбора плодов в период их съемной зрелости (Tutberidze et al., 2012). Химический состав плодов киви, выращенных в условиях Юга России, подчеркивает их высокую питательность и антиоксидантные свойства. Лечебно-профилактическая их ценность обусловлена наличием пектиновых веществ, которые в наибольшем количестве накапливают плоды сортов 'Abbot', 'Hayward', 'Allison'. Определены сортовые различия в содержании растворимых сухих веществ, органических кислот (лимонной и яблочной), сахаров, в частности глюкозы, фруктозы и сахарозы, а также витамина С, полифенолов, минеральных, ароматических веществ, пектинов и аминокислот. Для развития консервного производства рекомендуются сорта киви 'Abbot', 'Allison', 'Monty' (Prichko et al., 2013).

Несмотря на большую популярность у потребителя плодов *A. chinensis* var. *deliciosa*, наличие их опушенности часто воспринимается негативно. В НИИ сельского хозяйства Академии наук Абхазии с 2003 г. проводят селекционные работы по созданию сортов актинидии сладкой, или *A. chinensis* var. *deliciosa*, отличающихся меньшей опушенностью плодов или полным ее отсутствием. В 2016 г. отобрали несколько голоплодных сортов: 'Апсны', 'Победитель', 'Гулрипшский', 'Отхара', 'Слава'. Из них наиболее крупноплодными оказались 'Отхара' (56,96 г) и 'Слава' (80,23 г), плоды сортов 'Победитель' и 'Апсны' выделяются накоплением полифенолов (1364,8 и 1528,6 мг/100 г соответственно), сортов 'Слава' и 'Победитель' – содержанием аскорбиновой кислоты (1349,0 и 1042,0 мг/100 г соответственно). По комплексу признаков наиболее ценным является сорт 'Отхара' (Aiba, 2017; Aiba et al., 2024).

В Крым сорта *A. chinensis* var. *deliciosa* интродуцировали в 1986 г. из Болгарии. В коллекцию плодовых культур Никитского ботанического сада на Южном берегу Крыма были высажены растения трех сортов с функционально женскими цветками ('Abbot', 'Bruno' и 'Monty') и сорт-опылитель 'Tomury'. Позже посадили растения сорта 'Hayward', гибриды 'Monty' × 'Tomury', сеянцы сортов 'Abbot' и 'Monty', а также гибридные формы № 1 и № 2, выращенные из семян, полученных из Югославии. Наблюдения за растениями осуществляли с первого года их посадки на постоянное место (Sholokhova, Myazina, 1994). В Никитском ботаническом саду особое внимание уделяли репродуктивной сфере растений киви. В 1990–1993 гг. выполнена работа, результатом которой стала морфобиологическая характеристика развития репродуктивной сферы четырех сортов киви: 'Abbot', 'Bruno', 'Monty' с пестичными цветками и 'Tomury' с тычиночными. Выявлено, что в условиях Южного берега Крыма специализация тычиночных и пестичных цветков исследуемых сортов *A. chinensis* var. *deliciosa* следует после образования диска гинецея. В этот период в мужских цветках происходит редукция гинецея, в женских – андроцея. Цветение растений киви отмечали в первой-второй декадах июня при среднесуточной температуре 16,5°С и влажности воздуха 70%. Недостаток влаги в период роста плодов приводит к их опаданию. Предрасположенность культуры к широкой внутривидовой изменчивости открывает перспективы создания новых экотипов, гибридов и сортов, приспособленных к местным условиям возделывания (Kirilova, Chebotar, 2005).

В 1993 г. из питомника «Нордвуд» (Молалла, штат Орегон, США) был интродуцирован сорт киви 'Saanishton'. За растениями проводили наблюдения, изучали особенности их роста и развития в условиях южного побережья Крыма. В Никитском ботаническом саду начали селекционную работу по созданию наиболее адаптированных к условиям Крыма сортов *A. chinensis* var. *deliciosa*. Результатом таких исследований стало появление нового сорта 'Никитская Юбилейная'. Авторы – сотрудники Никитского ботанического сада Л. Ф. Мязина и Е. Л. Шишкина. Этот сорт получен в результате скрещивания сорта 'Saanishton' и 'Tomury'. Растения нового сорта характеризуются сдержанным ростом, невысокой зимостойкостью, урожайностью 100 ц/га. Плоды раннего срока созревания, массой 60–100 г, с сильным ароматом, отличного вкуса. Их потребительская зрелость на южном побережье Крыма наступает в первой декаде декабря (06.12). Этот сорт рекомендуется для выращивания в субтропических зонах Северо-Кавказского региона РФ и Южного берега Крыма, не выше 300 м н. у. м. (Shishkina, 2015; https://gossortrf.ru/registry). В Никитском ботаническом саду собрана коллекция сортов *A. chinensis* var. *deliciosa* (8 сортов), *A. kolomikta* (6) и *A. arguta* (7). В результате проведенных исследований в условиях Южного берега Крыма выявлены три наиболее урожайных сорта киви: 'Abbot', 'Bruno' и 'Monty'. Среди них сорт 'Bruno' выделяется более крупными плодами, поздним развитием растений и длительностью цветения (Andreev et al., 2025).

Заключение

На основании проведенного анализа установлено, что *Actinidia chinensis* var. *deliciosa* (киви), введенная в культуру в Новой Зеландии, является одним из популярных плодовых растений в мире.

В период с 1993 по 2023 г. отмечена тенденция значительного увеличения площади возделывания киви – с 60,0 до 286,3 тыс. га. Стабильно растет мировое производство плодов – с 0,90 млн т (в 1993 г.) до 4,4 млн т (в 2023 г.). Основным регионом – производителем плодов этой культуры является Азия (54,5%), значительное количество также выращивают в Европе (24,1%), небольшие сборы осуществляются в Океании (14,4%) и Америке (7,0%). Ведущими странами – производителями актинидии являются Китай, Италия, Новая Зеландия. Наиболее эффективное производство актинидии отмечено в этих и других производящих плоды актинидии странах, что связано с использованием высокоурожайных насаждений интенсивного типа и выращиванием современных сортов. Отмечен значительный рост производства плодов *A. chinensis* var. *deliciosa*. Выявлены тенденции по возделыванию насаждений *A. kolomikta* и *A. arguta*. Создание новых сортов актинидий и выделение благоприятных районов выращивания позволят увеличить в России, в частности в Крыму, ассортимент плодовой продукции.

References / Литература

Abe D., Saito T., Kubo Y., Nakamura Y., Sekiya K. A fraction of unripe kiwi fruit extract regulates adipocyte differentiation and function in 3T3-L1 cells. *BioFactors*. 2010;36(1):52-59. DOI: 10.1002/biof.70

Aiba L.Ya. Kiwi crop (*Actinidia deliciosa*) in Abkhazia: from introduction to new cultivars (Kultura kivi (*Actinidia deliciosa*) v Abkhazii: ot introduktsii do novykh sortov). *Bulletin of the Academy of Sciences of Abkhazia. Natural Sciences Series*. 2017;(7);98-106. [in Russian] (Айба Л.Я. Культура киви (*Actinidia deliciosa*) в Абхазии: от интродукции до новых сортов. *Вестник Академии наук Абхазии. Серия «Естественные науки»*. 2017;(7);98-106).

Aiba L.Ya., Platonova N.B., Belous O.G. Characteristics of new cultivars of kiwi breeding by the NIISH ANA. *Bulletin of the State Nikita Botanical Gardens*. 2024;(150):7-15. [in Russian] (Айба Л.Я., Платонова Н.Б., Белоус О.Г. Биохимический состав и товарная характеристика новых сортов *Actinidia deliciosa* A. Chev. селекции НИИСХ АНА. *Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада*. 2024;(150):7-15). DOI: 10.25684/0513-1634-2024-150-7-15

Andreev R.O., Goncharenko V.A., Rybalkin E.P., Gorina V.M. Biological features of introduced *Actinidia deliciosa* Chev. cultivars in the conditions of the Southern Coast of Crimea. *Bulletin of the State Nikita Botanical Gardens*. 2025;(154):55-63. [in Russian] (Андреев Р.О., Гончаренко В.А., Рыбалкин Е.П., Горина В.М. Биологические особенности интродуцированных сортов *Actinidia deliciosa* A. Chev. в условиях Южного берега Крыма. *Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада*. 2025;(154):55-63).

Asadi M., Ghasemnezhad M., Olfati J., Bakhshipour A., Mirjalili M.H., Atak A. Comparison of important quality components of red-flesh kiwifruit (*Actinidia chinensis*) in different locations. *Open Agriculture*. 2024;*9*(1):20220283. DOI: 10.1515/opag-2022-0283

Besedina T.D., Tutberidze C.V., Torya G.B. The modern methods of management *Actinidia deliciosa* (kiwi) production potential in the conditions of Russian humid subtropics. *Fruit Growing*. 2019;31(1):150-156. [in Russian] (Беседина Т.Д., Тутберидзе Ц.В., Тория Г.Б. Современные способы управления продукционным потенциалом *Actinidia deliciosa* (киви) в условиях влажных субтропиков России. *Плодоводство*. 2019;31(1):150-156).

Besedina T.D., Tutberidze Ts.V., Thoria G.B. Agroecological regionalization of *Actinidia deliciosa* (kiwi) in humid subtropics of Russia. *Horticulture and Viticulture*. 2016;(6):46-51. [in Russian] (Беседина Т.Д., Тутберидзе Ц.В., Тория Г.Б. Агроэкологическое районирование актинидии деликатесной (*Actinidia deliciosa*) во влажных субтропиках России. *Садоводство и виноградарство*. 2016;(6):46-51). DOI: 10.18454/VSTISP.2016.6.3917

Brondino L., Peano C., Giuggioli N.R. Coatings role in the baby kiwi shelf life. *Acta Horticulturae*. 2022;1332:423-432. DOI: 10.17660/ActaHortic.2022.1332.56

Catalogue of breeding achievements: [website]. [in Russian] (Каталог селекционных достижений: [сайт]). URL: https://gossortrf.ru/registry [дата обращения: 30.01.2025].

Chang C.C., Lin Y.T., Lu Y.T., Liu Y.S., Liu J.F. Kiwifruit improves bowel function in patients with irritable bowel syndrome with constipation. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*. 2010;19(4):451-457. DOI: 10.6133/apjcn.2010.19.4.01

Cho H.S., Kim Y.M., Lee S.M., Cho Y.S. Artificial pollination timing of *Actinidia eriantha* 'Bidan' for commercial production. *Acta Horticulturae*. 2022;1332:227-230. DOI: 10.17660/ActaHortic.2022.1332.30

Ciacci S., Merni F., Bartolomei S., Di Michele R. Sprint start kinematics during competition in elite and world-class male and female sprinters. *Journal of Sports Sciences*. 2017;35(13):1270-1278. DOI: 10.1080/02640414.2016.1221519

Costa G., Testolin R. Recent changes in the kiwifruit (*Actinidia* spp.) industry since its introduction: Italy as a case study. *Acta Horticulturae*. 2022;1332:1-10. DOI: 10.17660/ActaHortic.2022.1332.1

Du G., Li M., Ma F., Liang D. Antioxidant capacity and the relationship with polyphenol and vitamin C in *Actinidia* fruits. *Food Chemistry*. 2009;113(2):557-562. DOI: 10.1016/j.foodchem.2008.08.025

FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Statistics: [website]. Available from: http://www.fao.org/faostat/ru [accessed Dec. 18, 2024].

Flora of China. 34. *Actinidia chinensis* Planchon: [website]. Available from: http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=2&taxon_id=200013894 [accessed Dec. 18, 2024].

Giangrieco I., Proietti S., Moscatello S., Tuppo L., Battistelli A., La Cara F. et al. Influence of geographical location of orchards on green kiwifruit bioactive components. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2016;64(48):9172-9179. DOI: 10.1021/acs.jafc.6b03930

Göksel Z., Atak A., Tunçkal C., Yemenicioğlu A. Determination of quality characteristics and shelf life of kiwifruit (*A. chinensis* var. *deliciosa* 'Hayward') slices by drying them in a heat pump dryer at different water content values. *Acta Horticulturae*. 2022;1332:311-320. DOI: 10.17660/ActaHortic.2022.1332.41

Goroshko V.V. A new fruit crop: kiwi (Novaya plodovaya kultura kiwi). Simferopol; 1992. [in Russian] (Горошко В.В. Новая плодовая культура киви. Симферополь; 1992).

İslam A., Karakaya O., Karagöl S., Atak A. Phenological and fruit characteristics of kiwifruit cultivars grown in Ordu region (Turkey). *Acta Horticulturae*. 2022;1332:433-438. DOI: 10.17660/ActaHortic.2022.1332.57

Kahraman K.A., Atak A., Doyğacı Y., Gülbasar K.G., Şen A. Preliminary selection studies in the kiwifruit breeding program in Turkey: characteristics of some selected kiwifruit genotypes. *Acta Horticulturae*. 2022;1332:79-86. DOI: 10.17660/ActaHortic.2022.1332.11

Kataoka I., Matsuoka M., Beppu K., Ohtani M. High temperature tolerance of Sanuki Kiwicco® kiwifruit interspecific hybrid *Actinidia rufa* × *A. chinensis* var. *chinensis*. *Acta Horticulturae*. 2022;1332:23-30. DOI: 10.17660/ActaHortic.2022.1332.4

Kim Y.J., Lee J.O., Kim S.Y., Lee J.M., Lee E., Na J. et al. Effect of *A. polygama* APEE (*Actinidia polygama* ethanol extract) or APWE (*Actinidia polygama* water extract) on wrinkle formation in UVB-irradiated hairless mice. *Journal of Cosmetic Dermatology*. 2023;22(1):311-319. DOI: 10.1111/jocd.14925

Kirilova O.I., Chebotar A.A. About sexual reproduction of introduced varieties of kiwi in the Crimea. *Works of the State Nikita Botanical Gardens*. 2005;125:67-79. [in Russian] (Кириллова О.И., Чеботарь А.А. О половой репродукции интродуцированных сортов киви в Крыму. *Сборник научных трудов Государственного Никитского ботанического сада*. 2005;125:67-79).

Klemeshova K.V. Adaptive potential of fuzzy kiwi (*Actinidia deliciosa* Chevalier) in the humid subtropics of Russia (Adaptivny potentsial aktinidii sladkoy (*Actinidia deliciosa* Chevalier) v usloviyakh vlaznykh subtropikov Rossii)

[dissertation]. Sochi; 2012. [in Russian] (Клемешова К.В. Адаптивный потенциал актинидии сладкой (*Actinidia deliciosa* Chevalier) в условиях влажных субтропиков России: дис. ... канд. с.-х. наук. Сочи; 2012).

Kolbasina E.I. Actinidia (*Actinidia* Lindl.) and lemongrass (*Schisandra* A. Michaux) in the Non-Black-Earth Zone of Russia: biology, introduction, and source material for breeding (Aktinidiya (*Actinidia* Lindl.) i limonnik (*Schisandra* A. Michaux) v Nechernozemnoy zone Rossii: biologiya, introduktsiya, iskhodny material dlya selektsii) [dissertation]. St. Petersburg; 1996. [in Russian] (Колбасина Э.И. Актинидия *Actinidia* Lindl. и лимонник *Schisandra* A. Michaux в Нечерноземной зоне России: биология, интродукция, исходный материал для селекции: дис. … докт. биол. наук. Санкт-Петербург; 1996).

Kolbasina E.I. Actinidia and lemongrass in Russia (Aktinidiya i limonnik v Rossii). Moscow: Russian Agricultural Academy; 2000. [in Russian] (Колбасина Э.И. Актинидия и лимонник в России. Москва: Россельхозакадемия; 2000).

Kozak N.V., Imamkulova Z.A., Kulikov I.M., Vlasova E.V., Medvedev S.M., Ilyinova L.N. Rare berry crops: morphology, biochemistry, ecology (Redkiye yagodnye kultury: morfologiya, biokhimiya, ekologiya). Moscow: ARHIBAN; 2020. [in Russian] (Козак Н.В., Имамкулова З.А., Куликов И.М., Власова Е.В., Медведев С.М., Ильинова Л.Н. Редкие ягодные культуры: морфология, биохимия, экология. Москва: ФГБНУ ВСТИСП; 2020).

Kozak N.V., Imamkulova Z.A., Motyleva S.M., Mertvishcheva M.Ye., Medvedev S.N., Gins M.S. et al. Selection of *Actinidia polygama* (Siebold et Zucc.) Maxim. in ARHIBAN. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*. 2018;(73):95-99. [in Russian] (Козак Н.В., Имамкулова З.А., Мотылева С.М., Мертвищева М.Е., Медведев С.Н., Гинс М.С. и др. Селекция *Actinidia polygama* (Siebold et Zucc.) Maxim. в ФГБНУ ВСТИСП. *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2018;(73):95-99). DOI: 10.21515/1999-1703-73-95-99

Krakhmaleva I.L., Molkanova O.I., Orlova N.D., Koroleva O.V., Mitrofanova I.V. Plant growth regulators on the micropropagtion of *Actinidia* cultivars. *Ciênciae Agrotecnologia*. 2023;47(3):e008923. DOI: 10.1590/1413-7054202347008923

Latocha P., Debersaques F., Decorte J. Varietal differences in mineral composition of kiwiberry – *Actinidia arguta* (Siebold et Zucc.) Planch. ex. Miq. *Acta Horticulture*. 2015;1096:479-48. DOI: 10.17660/ActaHortic.2015.1096.59

Li H.Y., Yuan Q., Yang Y.L., Han Q.H., He J.L., Zhao L. et al. Phenolic profiles, antioxidant capacities, and inhibitory effects on digestive enzymes of different kiwifruits. *Molecules*. 2018;23(11):2957. DOI: 10.3390/molecules23112957

Liang C.F., Ferguson A.R. Emendation of the Latin name of *Actinidia chinensis* Pl. var. *hispida* C.F. Liang. *Guihaia*. 1984;4(3):181-182.

LiveInternet. The history of kiwi emergence (Istoriya vozniknoveniya kivi): [website]. [in Russian] (LiveInternet. История возникновения киви: [сайт]). URL: http://www.liveinternet.ru/users/lviza_neo/post125503850 [дата обращения: 11.12.2024].

Ma J.T., Li D.W., Liu J.K., He J. Advances in research on chemical constituents and their biological activities of the genus *Actinidia*. *Natural Products and Bioprospecting*. 2021;11(6):573-609. DOI: 10.1007/s13659-021-00319-8

Mahlaba N., Tesfay S.Z., Dodd M., Magwaza L.S., Mditshwa A., Ngobese N.Z. Determination of optimal maturity indices for South African golden kiwifruit cultivars. *Acta Horticulturae*. 2022;1332:335-342. DOI: 10.17660/ActaHortic.2022.1332.44

Molkanova O.I., Konovalova L.N., Kozak N.V., Malaeva E.V. Biological peculiarities of Far Eastern species of the genus *Actinidia* Lindl. *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*. 2014;(1):42-48. [in Russian] (Молканова О.И., Коновалова Л.Н., Козак Н.В., Малаева Е.В. Биологические особенности дальневосточных видов рода *Actinidia* Lindl. *Вестник Удмуртского Университета. Серия Биология. Науки о Земле*. 2014;(1):42-48).

Motyleva S.M., Kozak N.V., Kulikov I.M. The low molecular weight metabolites in the water extract of fruits of *Actinidia* Lindl. *Problems of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry*. 2018;21(10):91-97. [in Russian] (Мотылева С.М., Козак Н.В., Куликов И.М. Низкомолекулярные метаболиты в водном экстракте плодов *Actinidia* Lindl. *Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии*. 2018;21(10):91-97). DOI: 10.29296/25877313-2018-10-18

Nishiyama I., Yamashita Y., Yamanaka M., Shimohashi A., Fukuda T., Oota T. Varietal difference in vitamin C content in the fruit of kiwifruit and other actinidia species. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2004;52(17):5472-5475. DOI:10.1021/jf049398z

Nut-bearing and subtropical fruit crops (Orekhoplodnye i subtropicheskiye plodovye kultury). Simferopol: ARIAL; 2012. [in Russian] (Орехоплодные и субтропические плодовые культуры. Симферополь: АРИАЛ; 2012).

Panishcheva D., Motyleva S., Kozak N. The comparison of biochemical composition of *Actinidia kolomikta* and *Actinidia polygama* fruits. *Slovak Journal of Food Sciences*. 2021;15:723-731. DOI: 10.5219/1682

Park K.L., Hong S.W. Kim Y.J. Kim S.J., Chung K.S. Manufacturing and physicochemical properties of wine using hardy kiwi fruit (*Actinidia arguta*). *Microbiology and Biotechnology Letters*. 2013;41(3):327-334. DOI: 10.4014/kjmb.1301.01002

Plekhanova M.N. Actinidia (Aktinidiya). In: G.V. Eremin (ed.). *General and Private Breeding and Cultivar Studies of Fruit and Berry Crops (Obshchaya i chastnaya selektsiya i sortovedeniye plodovykh i yagodnykh kultur)*. Moscow: Mir; 2004. p.410-417. [in Russian] (Плеханова М.Н. Актинидия. В кн.: *Общая и частная селекция и сортоведение плодовых и ягодных культур* / под ред. Г.В. Еремина. Москва: Мир; 2004. С.410-417).

Plekhanova M.N., Kolbasina E.I. Actinidia and lemongrass (Aktinidiya i limonnik) In: E.N. Sedov, T.P. Ogoltsova (eds). *Program and Methodology of Variety Studies for Fruit, Berry and Nut Crops (Programma i metodika sortoizucheniya plodovykh, yagodnykh i orekhoplodnykh kultur)*. Orel: VNIISPK; 1999. p.458-466. [in Russian] (Плеханова М.Н., Колбасина Э.И. Актинидия и лимонник. В кн.: *Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур* / под ред. Е.Н. Седова, Т.П. Огольцовой. Орел: ВНИИСПК; 1999. С.458-466).

Popova V.P. (ed.). Developments shaping the modern appearance of horticulture: a monograph (Razrabotki, formiruyushchiye sovremenny oblik sadovodstva: monografia). Krasnodar: North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making; 2011. [in Russian] (Разработки, формирующие современный облик садоводства: монография / под ред. В.П. Поповой. Краснодар: Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия; 2011).

Prichko T.G., Germanova M.G., Tutberidze Ts.V. Food value of kiwi fruits and their use in technology of producing new kinds of canned products. *Contemporary Horticul-*

ture. 2013;3(7):116-124. [in Russian] (Причко Т.Г., Германова М.Г., Тутберидзе Ц.В. Пищевая ценность плодов киви и их использование в технологии получения новых видов консервной продукции. *Современное садоводство*. 2013;3(7):116-124).

Santoni F., Paolini J., Barboni T., Costa J. Relationships between the leaf and fruit mineral compositions of *Actinidia deliciosa* var. Hayward according to nitrogen and potassium fertilization. *Food Chemistry*. 2014;147:269-271. DOI: 10.1016/j.foodchem.2013.09.154

Sedov E.N., Gruner L.A. (eds). Pomology: in 5 volumes. Vol. 5. Strawberry. Raspberry. Nut-bearing and rare crops (Pomologiya: v 5-ti tomakh. T. 5. Zemlyanika. Malina. Orekhoplodnye i redkiye kultury). Orel: VNIISPK; 2014. [in Russian] (Помология: в 5-ти томах. Том 5. Земляника. Малина. Орехоплодные и редкие культуры / под ред. Е.Н. Седова, Л.А. Грюнер. Орел: ВНИИСПК; 2014).

Shishkina E.L. Introduction and selection of *Actinidia deliciosa* Chev. in Nikitsky Botanical Garden. *Subtropical and Ornamental Horticulture*. 2015;(54):67-72. [in Russian] (Шишкина Е.Л. Интродукция и селекция *Actinidia deliciosa* Chev. в Никитском ботаническом саду. *Субтропическое и декоративное садоводство*. 2015;(54):67-72).

Sholokhova V.A., Myazina L.F. Introduction and variety investigation of kiwifruit (*Actinidia chinensis* Planch.) in south coast of the Crimea. *Works of the State Nikita Botanical Gardens*. 1994;114:63-70. [in Russian] (Шолохова В.А., Мязина Л.Ф. Интродукция и сортоизучение актинидии китайской (киви) на Южном берегу Крыма. *Сборник научных трудов Государственного Никитского ботанического сада*. 1994;114: 63-70).

Sobolev G.I. *Actinidia kolomikta* – a promising berry-bearing liana (Aktinidiya kolomikta – perspektivnaya yagodnaya liana). *Pomiculture and Small Fruits Culture in Russia*. 2010;23:179-187. [in Russian] (Соболев Г.И. Актинидия коломикта – перспективная ягодная лиана. *Плодоводство и ягодоводство России*. 2010;23:179-187).

Stănică F., Iliescu L.M., Zuccherelli G. Promising kiwifruit hybrid elites from the Romanian-Italian breeding program. *Acta Horticulturae*. 2022;1332:19-22. DOI: 10.17660/ActaHortic.2022.1332.2

Tarasenko V.S. Cultivation of kiwi in Russia (Vozdelyvaniye kivi v Rossii). M.N. Plekhanova (ed.). St. Petersburg: VIR; 1999. [in Russian] (Тарасенко В.С. Возделывание киви в России / под ред. М.Н. Плехановой. Санкт-Петербург: ВИР, 1999).

Tsiupka S.Yu. State analysis and global trends in the cultivation of European olives. *Plant Biology and Horticulture: Theory, Innovation*. 2019;1(150):78-84. [in Russian] (Цюпка С.Ю. Анализ состояния и мировые тенденции выращивания маслины европейской. *Биология растений и садоводство: теория, инновации*. 2019;1(150):78-84). DOI: 10.36305/2019-1-150-78-84

Tutberidze C.V., Besedina T.D., Dobezhina S.V. Estimation of *Actinidia deliciosa* cultivars (kiwi) adaptive potential in Russian subtropics. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2012;(80):47-58. [in Russian] (Тутберидзе Ц.В., Беседина Т.Д., Добежина С.В. Оценка адаптивного потенциала сортов *Actinidia deliciosa* (киви) в субтропиках России. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2012;(80):47-58).

Tutberidze Ts.V., Besedina T.D., Toriya G.B. The effect of weather conditions in Russian humid subtropics on the yield value of kiwifruit cultivars *Actinidia deliciosa*. *Subtropical and Ornamental Horticulture*. 2016;(58):161-166. [in Russian] (Тутберидзе Ц.В., Беседина Т.Д., Тория Г.Б. Влияние погодных условий влажных субтропиков России на величину урожая сортов актинидии деликатесной (*Actinidia deliciosa*). *Субтропическое и декоративное садоводство*. 2016;(58):161-166).

Vdovenko-Martynova N.N., Adzhiakhmetova S.L., Bezrodnova E.I., Pozdnyakov D.I. Studies on the identification of indicators of the authenticity of plant raw materials – *Actinidia arguta* Folia and the content of the prevailing groups of biologically active compounds. *Bulletin of the State Nikita Botanical Gardens*. 2021;1(138):101-109. [in Russian] (Вдовенко-Мартынова Н.Н., Аджиахметова С.Л., Безроднова Е.И., Поздняков Д.И. Исследования по выявлению показателей подлинности растительного сырья – *Actinidia arguta* Folia и содержанию основных групп биологически активных веществ. *Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада*. 2021;1(138):101-109). DOI: 10.36305/0513-1634-2021-138-101-109

Vetharaniam I., van den Dijssel C., Stanley J., Richardson A., Müller K. Projecting suitability of kiwifruit by chill requirements for different locations in New Zealand under climate change. *Acta Horticulturae*. 2022;1332:455-462. DOI: 10.17660/ActaHortic.2022.1332.60

Vitkovsky V.L. Fruit plants of the world (Plodovye rasteniya mira). St. Petersburg; Moscow; Krasnodar: Lan; 2003. [in Russian] (Витковский В.Л. Плодовые растения мира. Санкт-Петербург; Москва; Краснодар: Лань; 2003).

Zakharenko E.M. Technology of fruit wines from fruit of Actinidia (*Actinidia kolomikta* and *Actinidia polygama*). *Bulletin of Pacific State Economic University*. 2010;(1):87-92). [in Russian] (Захаренко Е.М. Технология плодовых вин из актинидии (*Actinidia kolomikta* и *Actinidia polygama*). *Вестник Тихоокеанского государственного экономического университета*. 2010;(1):87-92).

Zehra A., Naik H.R., Nayik G.A., Kour J., Sangeeta, Bobis O. et al. Kiwi. In: G.A. Nayik, A. Gull (eds). *Antioxidants in Fruits: Properties and Health Benefits*. Singapore: Springer; 2020. p.547-561. DOI: 10.1007/978-981-15-7285-2_28

Zhong C., Huang W., Wang Z., Li L., Li D., Zhang Q. et al. The breeding progress and development status of the kiwifruit industry in China. *Acta Horticulturae*. 2022;1332:445-454. DOI: 10.17660/ActaHortic.2022.1332.59

Информация об авторах

Роман Олегович Андреев, аспирант, младший научный сотрудник, Никитский ботанический сад – Национальный научный центр Российской академии наук, 298648 Россия, Республика Крым, Ялта, Никита, Никитский спуск, 52, romario_kebi@inbox.ru, https://orcid.org/0009-0004-0402-1236

Наталья Васильевна Козак, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный научный селекционно-технологический центр садоводства и питомниководства, 115598 Россия, Москва, ул. Загорьевская, 4, nat.kozak09@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-6343-5982

Сергей Юрьевич Цюпка, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Никитский ботанический сад – Национальный научный центр Российской академии наук, 298648 Россия, Республика Крым, Ялта, Никита, Никитский спуск, 52, tsupkanbg@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1678-014X

Владимир Александрович Гончаренко, заведующий лабораторией, Никитский ботанический сад – Национальный научный центр Российской академии наук, 298648 Россия, Республика Крым, Ялта, Никита, Никитский спуск, 52, vg_krim@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2484-5684

Валентина Милентьевна Горина, доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Никитский ботанический сад – Национальный научный центр Российской академии наук, 298648 Россия, Республика Крым, Ялта, Никита, Никитский спуск, 52, valgorina@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-1279-8959

Information about the authors

Roman O. Andreev, Postgraduate Student, Associate Researcher, Nikita Botanical Gardens – National Research Center of the Russian Academy of Sciences, 52 Nikitsky Spusk, Nikita, Yalta 298648, Republic of Crimea, Russia, romario_kebi@inbox.ru, https://orcid.org/0009-0004-0402-1236

Natalia V. Kozak, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, Federal Horticultural Center for Breeding, Agrotechnology and Nursery, 4 Zagoryevskaya St., Moscow 115598, Russia, nat.kozak09@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-6343-5982

Sergei Yu. Tsiupka, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, Nikita Botanical Gardens – National Research Center of the Russian Academy of Sciences, 52 Nikitsky Spusk, Nikita, Yalta 298648, Republic of Crimea, Russia, tsupkanbg@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1678-014X

Vladimir A. Goncharenko, Head of a Laboratory, Nikita Botanical Gardens – National Research Center of the Russian Academy of Sciences, 52 Nikitsky Spusk, Nikita, Yalta 298648, Republic of Crimea, Russia, vg_krim@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2484-5684

Valentina M. Gorina, Dr. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Nikita Botanical Gardens – National Research Center of the Russian Academy of Sciences, 52 Nikitsky Spusk, Nikita, Yalta 298648, Republic of Crimea, Russia, valgorina@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-1279-8959

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 04.02.2025; одобрена после рецензирования 11.06.2025; принята к публикации 03.09.2025.
The article was submitted on 04.02.2025; approved after reviewing on 11.06.2025; accepted for publication on 03.09.2025.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 58.085:634.75:579.64
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-80-91

CC BY

Влияние инокуляции штаммами ризобактерий микрорастений земляники *in vitro* на их стрессовый ответ при культивировании *ex vitro* в условиях гидропоники

А. А. Куликов[1], О. В. Ткаченко[1], Н. В. Евсеева[2], К. Ю. Каргаполова[1], А. Ю. Денисова[1], Н. Н. Позднякова[2], Г. Л. Бурыгин[1, 2], А. А. Широков[2]

[1] *Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, Саратов, Россия*

[2] *Федеральный исследовательский центр «Саратовский научный центр Российской академии наук», Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов, Саратов, Россия*

Автор, ответственный за переписку: Оксана Викторовна Ткаченко, oktkachenko@yandex.ru

Актуальность. Предварительная инокуляция микрорастений *in vitro* рост-стимулирующими микроорганизмами может положительно влиять на их адаптацию к условиям *ex vitro*. Цель работы – изучение влияния бактеризации микроклонов земляники в культуре *in vitro* ризосферными штаммами *Azospirillum baldaniorum* Sp245 и *Kocuria rosea* T1Ks19 на стрессовый ответ при культивировании *ex vitro* в условиях гидропоники.
Материалы и методы. В качестве макросимбионтов использовали микрорастения земляники сортов ‘Asia’ и ‘Vima Kimberly’, в качестве микросимбионтов – ризобактерии из коллекции ризосферных микроорганизмов Института биохимии и физиологии растений и микроорганизмов (г. Саратов). Ко-инокуляция бактериями проводилась в условиях *in vitro* (10^6 КОЕ/мл), затем 45-суточные растения высаживали в гидропонную установку (*ex vitro*). В динамике анализировали морфометрические и биохимические показатели растений и количество бактерий на поверхности корней.
Результаты. Инокуляция микрорастений земляники в условиях *in vitro* штаммами ризобактерий не приводила к контаминации питательной среды. Оба штамма обнаруживались на корнях в течение всего периода адаптации. Бактеризация микрорастений приводила после 20 суток адаптации к снижению длины корней у обоих сортов и количества листьев у растений сорта ‘Vima Kimberly’, но без изменения биомассы побегов. В процессе адаптации у бактеризованных растений в отличие от контрольных лучше поддерживался стабильный уровень фотосинтетических пигментов. У бактеризованных растений к 20-м суткам количество пигментов значительно превышало таковое в контрольных вариантах. Отмечена сортоспецифическая реакция изменения активности антиоксидантных ферментов (пероксидаза, каталаза, аскорбат пероксидаза) и содержания малонового диальдегида.
Заключение. Установлено, что инокуляция *in vitro* микрорастений земляники ризобактериями приводила к снижению стрессового ответа у растений сортов ‘Asia’ и ‘Vima Kimberly’ на этапе культивирования *ex vitro*.

Ключевые слова: *Fragaria × ananassa* (Weston) Duchesne ex Rozier, ризосферные бактерии, гидропоника, клональное микроразмножение *in vitro*, адаптация *ex vitro*

Благодарности: работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-26-00087, https://rscf.ru/en/project/22-26-00087.
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Куликов А.А., Ткаченко О.В., Евсеева Н.В., Каргаполова К.Ю., Денисова А.Ю., Позднякова Н.Н., Бурыгин Г.Л., Широков А.А. Влияние инокуляции штаммами ризобактерий микрорастений земляники *in vitro* на их стрессовый ответ при культивировании *ex vitro* в условиях гидропоники. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(3):80-91. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-80-91

© Куликов А.А., Ткаченко О.В., Евсеева Н.В., Каргаполова К.Ю., Денисова А.Ю., Позднякова Н.Н., Бурыгин Г.Л., Широков А.А., 2025

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-80-91

The effect of *in vitro* inoculation of strawberry microplants with rhizobacteria strains on their stress response during *ex vitro* cultivation under hydroponic conditions

Artem A. Kulikov[1], Oksana V. Tkachenko[1], Nina V. Evseeva[2], Kristina Yu. Kargapolova[1], Alena Yu. Denisova[1], Natalia N. Pozdnyakova[2], Gennady L. Burygin[1, 2], Alexander A. Shirokov[2]

[1] *Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia*

[2] *Saratov Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms, Saratov, Russia*

Corresponding author: Oksana V. Tkachenko, oktkachenko@yandex.ru

Background. Preliminary inoculation of microplants *in vitro* with growth-promoting rhizobacteria can positively affect their adaptation to *ex vitro* conditions. The aim of the work was to study the effect of inoculation of strawberry microclones in *in vitro* culture with *Azospirillum baldaniorum* Sp245 and *Kocuria rosea* T1Ks19 on the stress response during *ex vitro* cultivation under hydroponic conditions.
Materials and methods. Strawberry microplants of cvs. 'Asia' and 'Vima Kimberly' were used as macrosymbionts. The rhizobacteria from the collection of rhizosphere microorganisms of the Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms (Saratov) served as microsymbionts. Co-inoculation with bacteria was carried out *in vitro* (10^6 CFU/mL), then 45-day-old plants were planted in a hydroponic setup (*ex vitro*). The morphometric and biochemical parameters of plants and the number of bacteria on the root surface were analyzed dynamically.
Results. *In vitro* inoculation of strawberry microplants with rhizobacteria strains did not lead to contamination of the nutrient medium. Both strains were detected on the roots throughout the adaptation period. Bacterization of microplants resulted in a decrease in the root length in both cultivars and the number of leaves in 'Vima Kimberly' after 20 days of adaptation, but without changing the shoot biomass. During the adaptation process, the bacterized plants, unlike the controls, maintained a stable level of photosynthetic pigments better. By the 20th day, the amount of pigments in bacterized plants was significantly higher than in the control variants. A cultivar-specific reaction of the activity of antioxidant enzymes (peroxidase, catalase, and ascorbate peroxidase) and malondialdehyde was noted.
Conclusion. It was found that *in vitro* inoculation of strawberry microplants with rhizobacteria resulted in a decrease in the stress response in plants of cvs. 'Asia' and 'Vima Kimberly' at the *ex vitro* cultivation stage.

Keywords: *Fragaria × ananassa* (Weston) Duchesne ex Rozier, rhizosphere bacteria, hydroponics, *in vitro* clonal micropropagation, *ex vitro* adaptation

Acknowledgements: the work was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 22-26-00087, https://rscf.ru/en/project/22-26-00087.
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Kulikov A.A., Tkachenko O.V., Evseeva N.V., Kargapolova K.Yu., Denisova A.Yu., Pozdnyakova N.N., Burygin G.L., Shirokov A.A. The effect of *in vitro* inoculation of strawberry microplants with rhizobacteria strains on their stress response during *ex vitro* cultivation under hydroponic conditions. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(3): 80-91. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-80-91

Введение

Культивирование земляники садовой (*Fragaria × ananassa* (Weston) Duchesne ex Rozier) с применением инновационных агротехнологий происходит с высокой эффективностью. Однако для получения стабильных и высоких урожаев ягод необходимо использовать высококачественный посадочный материал (Naing et al., 2019). Оздоровление растений земляники от грибных, вирусных, бактериальных заболеваний и вредителей методом культивирования *in vitro* изолированных апикальных меристем с последующей пролиферацией почек позволяет повысить качество посадочного материала и быстро удовлетворить спрос на новые высокоурожайные сорта (Stepanov, Moskovenko, 2016). Успех метода клонального микроразмножения *in vitro* часто ограничивается эффективностью этапа адаптации растений, произведенных в культуре *in vitro*, к условиям *ex vitro* (Hazarika et al., 2006).

Гидропоника – бессубстратный способ выращивания растений, который в настоящее время успешно применяется при выращивании оздоровленных растений земляники в контролируемых условиях (Madhavi et al., 2023). Этот метод позволяет размещать большее количество растений на меньшей площади, чем в открытом грунте, при этом создавая им оптимальные условия для круглогодичного роста. С одной стороны, он позволяет получать продукцию и тиражировать здоровые растения в контролируемых условиях, но с другой – предъявляет высокие фитопатологические требования к исходному материалу.

В настоящее время широко изучается возможность применения микроорганизмов для повышения урожайности и качества сельскохозяйственных культур (Wang et al., 2017). Доказано, что стимулирующие рост растений микроорганизмы, в том числе ризосферные бактерии (PGPM и PGPR), влияют на рост и развитие, смягчают абиотический и биотический стрессы, а также стимулируют ростовые процессы как в условиях *in vitro*, так и *ex vitro* (Orlikowska et al., 2017; Kha et al., 2020; Soumare et al., 2021; Cantabella et al., 2022). В ряде работ показана эффективность приема бактеризации растений земляники в различных условиях выращивания, в том числе в культуре *in vitro* и в гидропонных установках. Установлено положительное влияние на рост растений бактерий рода *Bacillus* (Dias et al., 2009; Mynett et al., 2022; de Moura et al., 2022). Штамм *Bacillus methylotrophicus* M4-96 в условиях *in vitro* не только стимулировал рост растений земляники, но и усиливал биосинтез каллозы в листьях, что повышало устойчивость к патогену *Botrytis cinerea* (Vicente-Hernández et al., 2019). Положительное влияние штамма *Azospirillum argentinense* REC3 на рост растений земляники в условиях гидропоники отмечена на питательном растворе обедненного состава (Guerrero-Molina et al., 2014).

В предварительных исследованиях нами показана положительная роль различных штаммов ризобактерий в повышении эффективности культивирования микроклонов картофеля *in vitro* (Burygin et al., 2019), адаптационной способности *ex vitro*, продуктивности растений картофеля в условиях защищенного грунта (Kargapolova et al., 2020) и аэропонной установки (Tkachenko et al., 2021), в том числе при ко-инокуляции штаммами *Azospirillum baldaniorum* Sp245 и *Kocuria rosea* T1Ks19 (Tkachenko et al., 2023a). Штамм *A. baldaniorum* Sp245 широко используется для инокуляции многих видов растений благодаря активному биосинтезу ауксинов и рост-стимулирующей способности (Soumare et al., 2021). Штамм *K. rosea* T1Ks19 выделен нами из корней картофеля и является аборигенным для Саратовской области. Коинокуляция одновременно штаммами разных таксономических групп считается более перспективной по сравнению с использованием отдельных штаммов за счет возможного синергетического эффекта (Sokolova et al., 2023).

Цель исследования – изучение влияния ризобактерий *A. baldaniorum* Sp245 и *K. rosea* T1Ks19 на микроклоны земляники *in vitro* и последующую их адаптацию *ex vitro* в условиях гидропонной установки.

Материалы и методы

Объектами исследования являлись микроклоны земляники садовой (*Fragaria × ananassa* (Weston) Duchesne ex Rozier) двух сортов ('Asia' и 'Vima Kimberly') из *in-vitro*-коллекции микрорастений Саратовского государственного университета генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова. Сорта 'Asia' (NewFruits, Италия) и 'Vima Kimberly' (Vissers Aardbeiplanten B.V., Нидерланды) являются среднеранними, неремонтантными и высокоурожайными (https://gossortrf.ru/registry/). *In-vitro*-коллекция создана путем культивирования апикальных меристем, культивируемых на питательной среде Мурасиге – Скуга.

Для инокуляции растений земляники использовали штаммы PGPR *A. baldaniorum* Sp245 (IBPPM 219) и *K. rosea* T1Ks19 (IBPPM 604) из коллекции ризосферных микроорганизмов Института биохимии и физиологии растений и микроорганизмов (ИБФРМ) (Саратов) (http://collection.ibppm.ru).

Микропобеги земляники помещали на агаризованную питательную среду Мурасиге – Скуга (с фитогормонами 6-бензиламинопурином – 0,5 мг/л и индолил-3-уксусной кислотой (ИУК) – 1 мг/л) и инокулировали суспензиями бактерий штаммов *A. baldaniorum* Sp245 и *K. rosea* T1Ks19 из расчета 10^6 клеток каждого штамма на 1 мл питательной среды. В качестве контроля служили растения *in vitro*, культивируемые без добавления суспензии бактерий. Условия культивирования *in vitro*: температура – +24°C; влажность воздуха – 60%; освещение – 3 тыс. люкс; продолжительность светового дня – 16 часов.

После 45 суток культивирования хорошо развитые укорененные микрорастения вынимали из пробирок и переносили в гидропонную установку FORTOP (Китай). Питательный раствор для выращивания растений содержал соли макроэлементов (г/100 л): KNO_3 – 20; NH_4NO_3 – 10; $MgSO_4 \times 7H_2O$ – 25; $Ca(NO_3)_2$ – 3,24; KH_2PO_4 – 8,64; $FeSO_4 \times 7H_2O$ – 1,1; ЭДТА – 1,44 и соли микроэлементов (г/100 л): $MnSO_4 \times 4H_2O$ – 0,22; H_3BO_3 – 0,30; $ZnSO_4 \times 7H_2O$ – 0,02; $CuSO_4 \times 5H_2O$ – 0,01; $Na_2MoO_4 \times 2H_2O$ – 0,02; KI – 0,01; $CoCl_2 \times 6H_2O$ – 0,02. Через 2 недели выращивания концентрацию основного питательного раствора увеличивали вдвое. Показатель pH поддерживали на уровне 5,7–6,0. Раствор циркулировал непрерывно, корневая система была наполовину погружена в раствор. Микрорастения выращивали при температуре 25°C днем и 20°C ночью, интенсивности освещения 3 тыс. люкс, фотопериоде 16 часов. Период культивирования в гидропонике длился 20 суток.

Морфометрическую оценку растений земляники проводили на 45-е сутки культивирования *in vitro* (0 суток

адаптации *ex vitro*), а также на 10-е и 20-е сутки адаптации в гидропонной установке. У 10 растений из каждого варианта опыта измеряли длину корня, количество листьев, а также сырую и сухую массы побегов и корней.

Для оценки биохимических показателей в каждой контрольной точке эксперимента отбирали по три растения из каждого варианта опыта. В листьях отобранных растений оценивали следующие показатели: содержание малонового диальдегида; активность антиоксидантных ферментов (пероксидазы, каталазы, аскорбатпероксидазы) по методике, описанной ранее (Tkachenko et al., 2023b). Содержание в листьях фотосинтетических пигментов проводили после экстракции диметилсульфоксидом, как описано в источниках (Wellburn, 1994).

В процессе культивирования растений *in vitro* и *ex vitro* для контроля бактерий на поверхности корней определяли количество колониеобразующих единиц (КОЕ) путем высева на агаризованную питательную среду LB 10-кратных разведений гомогената фрагментов корней (по 1 см) каждого варианта опыта. Определение принадлежности бактериальных колоний и клеток на корнях штаммам, использованным для инокуляции, проводили с помощью иммуноферментного анализа и иммунофлуоресцентной микроскопии корней на конфокальном микроскопе TCS SP5 (Leica Microsystems, Германия). Первичными антителами служили штамм-специфичные кроличьи антитела против соматических антигенов *A. baldaniorum* Sp245 и *K. rosea* T1Ks19 (концентрация – 50 мкг/мл) (Matora et al., 1998), вторичными антителами – козьи антикроличьи антитела, конъюгированные с пероксидазой (Jackson ImmunoResearch, США, концентрация – 0,8 мг/мл) и тетраметилродаминоизотиоцианатом (TRITC) (Abcam, США, концентрация – 5 мкг/мл).

Статистический анализ результатов проводили методом двухфакторного дисперсионного анализа со сравнением средних по наименьшей существенной разности (НСР) и по тесту Дункана при уровне значимости 95% ($P \le 0,05$). В таблицах и диаграммах варианты, достоверно различающиеся на основании теста Дункана, обозначены различными буквами латинского алфавита. Данные о морфологических, физиологических и биохимических параметрах растений получили в двух независимых экспериментах.

Результаты и их обсуждение

Инокулирование микрорастений земляники сортов ‘Asia’ и ’Vima Kimberly’ штаммами *A. baldaniorum* Sp245 и *K. rosea* T1Ks19 не оказывало существенного влияния на морфометрические параметры растений в условиях *in vitro*, контрольные и опытные растения обоих сортов достоверно не различались по анализируемым признакам.

Приживаемость растений в условиях гидропонной установки во всех вариантах опыта приближалась к 100% и достоверно не различалась.

На 20-е сутки культивирования в гидропонной установке наблюдали уменьшение длины корней у обоих сортов бактеризованных растений в среднем на 39% по сравнению с контрольным вариантом (таблица), что согласуется с нашими ранее опубликованными результатами (Tkachenko et al., 2023a).

Таблица. Морфометрические показатели микрорастений земляники сортов ‘Asia’ и ‘Vima Kimberly’ в контроле и при инокуляции бактериями *Azospirillum baldaniorum* Sp245 и *Kocuria rosea* T1Ks19 на 20-е сутки адаптации *ex vitro*

Table. Morphometric parameters of strawberry microplants of cvs. ‘Asia’ and ‘Vima Kimberly’ in the control variant and under inoculation with *Azospirillum baldaniorum* Sp245 and *Kocuria rosea* T1Ks19 bacteria on the 20th day of *ex vitro* adaptation

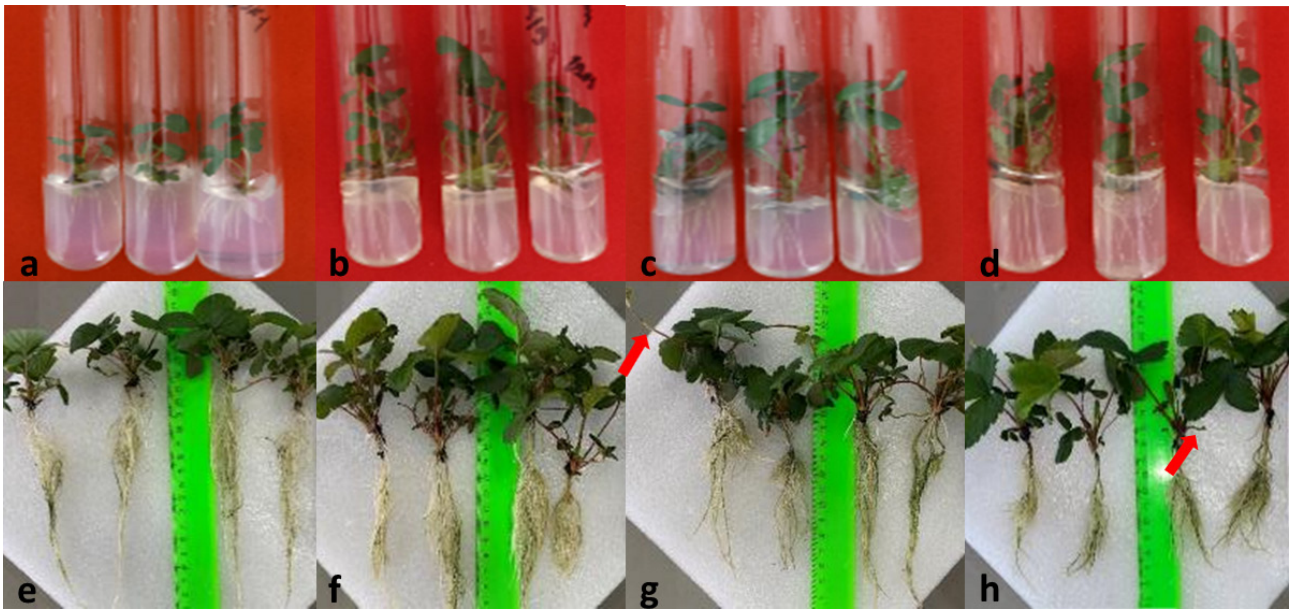
Сорт	Вариант	Длина корня, см	Количество листьев, шт.	Сырая масса побега, г	Сухая масса побега, г	Сырая масса корней, г	Сухая масса корней, г
‘Asia’	Контроль	19,12c	7,25b	1,14a	0,24	1,13	0,21
	Опыт	11,50ab	8,25b	1,46ab	0,44	1,14	0,25
‘Vima Kimberly’	Контроль	14,00b	8,25b	1,81b	0,38	1,83	0,40
	Опыт	8,75a	5,75a	1,95b	0,41	1,55	0,34
$F_{факт.}$		16,67*	8,04*	3,09*	1,34	2,73	2,42
$НСР_{0,05}$		3,46	1,33	0,61	–	–	–

Примечание: варианты, достоверно различающиеся на основании теста Дункана на 95% уровне значимости ($P \le 0,05$), обозначены различными буквами латинского алфавита; * –фактическое значение критерия Фишера превышает теоретическое

Note: the variants with statistically significant differences according to Duncan’s test at 95% significance level ($P \le 0.05$) are marked with different Latin letters; the asterisk (*) means that the actual value of the Fisher criterion exceeds the theoretical one

По количеству листьев у растений сорта ‘Asia’ не обнаружено различий между контрольными и опытными вариантами (см. таблицу). У сорта ‘Vima Kimberly’ в опытном варианте количество листьев уменьшилось на 30%. Сырая и сухая масса побегов и корней у бактеризованных и контрольных растений не различались. Растения сорта ‘Vima Kimberly’ в целом были крупнее растений сорта ‘Asia’ (рис. 1), что подтверждается большей сырой массой побега (см. таблицу). Отмечено появление побегов размножения (столонов) у части бактеризованных растений обоих сортов к концу периода адаптации (см. рис. 1).

Во всех вариантах опыта у растений в культуре *in vitro* содержание хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов в листьях не различалось. В процессе адаптации наблюдалось общее снижение содержания фотосинтетических пигментов в листьях во всех вариантах. На 10-е стуки выращивания в гидропонной установке различия между варианта-



Верхний ряд – растения перед высадкой в гидропонику, нижний ряд – на 20-е сутки культивирования в гидропонике (стрелками указаны развивающиеся столоны)

The top row shows plants before planting in hydroponics, the bottom one shows them on the 20th day of cultivation in hydroponics (the arrows indicate the developing stolons)

Рис. 1. Растения земляники без инокуляции (контроль) (a, e – 'Asia'; **b, f** – 'Vima Kimberly') **и с инокуляцией бактериями *Azospirillum baldaniorum* Sp245 и *Kocuria rosea* T1Ks19** (**c, g** – 'Asia'; **d, h** – 'Vima Kimberly')

Fig. 1. Strawberry plants without inoculation (control) (**a, e** – 'Asia'; **b, f** – 'Vima Kimberly') **and inoculated with *Azospirillum baldaniorum* Sp245 and *Kocuria rosea* T1Ks19 bacteria** (**c, g** – 'Asia'; **d, h** – 'Vima Kimberly')

ми не наблюдались, а на 20-е сутки у бактеризованных растений количество пигментов было значительно выше по сравнению с контрольными вариантами, в которых содержание пигментов существенно снижалось (рис. 2).

Активность антиоксидантных ферментов в опытном варианте сорта 'Asia' в целом была на том же уровне или ниже, чем в контрольных растениях (рис. 3, a, b, c), что может свидетельствовать о меньшем уровне стресса у растений. У сорта 'Vima Kimberly' в опытном варианте отмечено повышение активности пероксидазы *in vitro* в 3 раза по сравнению с контролем (рис. 3, b) и на 57% уровня активности каталазы на 10-е сутки адаптации (рис. 3, a), что указывает на активное регулирование бактериями окислительного стресса.

Низкий уровень стресса у опытных растений подтверждается тем, что содержание МДА существенно не отличалось в контрольных и опытных вариантах в условиях *in vitro* и на 10-е сутки адаптации. Но у сорта 'Vima Kimberly' на 20-е сутки выращивания в гидропонике содержание МДА повышалось в 2,2 раза (рис. 3, d), что может быть сигналом перехода опытных растений к следующему этапу физиологического развития (закладке столонов и почек вегетативного размножения, которые, как отмечалось выше, обнаруживались у некоторых опытных растений в этот период) (см. рис. 1).

На корнях бактеризованных растений земляники *in vitro*, а также на 10-е и 20-е сутки *ex vitro* определяли бактерии путем подсчета КОЕ штаммов, использованных для инокуляции (рис. 4), и иммунофлуоресцентной микроскопии (рис. 5, 6). Содержание ризобактерий *K. rosea* T1Ks19 на всех этапах было ниже, чем *A. baldaniorum* Sp245. Во всех вариантах опыта наблюдалось плавное снижение количества бактериальных клеток к 20-м суткам выращивания.

Методом иммунофлуоресцентной микроскопии с помощью флуоресцентно-меченых антител на микропрепаратах корней сортов 'Asia' и 'Vima Kimberly' подтвердилось присутствие обоих штаммов. Причем для штамма *A. baldaniorum* Sp245 можно отметить образование скоплений, тогда как *K. rosea* T1Ks19 обнаруживается в виде отдельных клеток или небольших скоплений.

Обнаруженный в данной работе эффект бактеризации микрорастений земляники на адаптационный потенциал согласуется с исследованиями других авторов, где рост-стимулирующее влияние зависело от штаммов бактерий и условий инокуляции. По опубликованным данным (Mynett et al., 2022), инокуляция микрорастений земляники бактериями *Bacillus velezensis* и *Bacillus amyloliqefaciens* стимулировала рост корневой системы, а именно площади, объема и диаметра корней. При этом, судя по приведенным в статье данным, длина корней снижалась под влиянием бактерий. Полученные в нашем исследовании результаты также показывают снижение длины корней без уменьшения их массы. Ранее на растениях картофеля установили, что бактерии, как правило, снижают рост корней в длину, но стимулируют их ветвление (Tkachenko et al., 2021, 2023a). Уменьшение длины и массы корней бактеризованных растений может быть связано с увеличением содержания цитокининов в корнях бактеризованных растений (Arkhipova et al., 2020). Известно, что цитокинины ингибируют рост корня растяжением (Liu et al., 2022).

Содержание фотосинтетических пигментов увеличивается в условиях недостаточного освещения (Choi, 2021), что может объяснить повышенное содержание хлорофилла и каротиноидов на этапе культивирования растений *in vitro* и снижение после высадки в гидропонную установку. Повышенное содержание фотосинтетических пигментов в бактеризованных растениях по сравне-

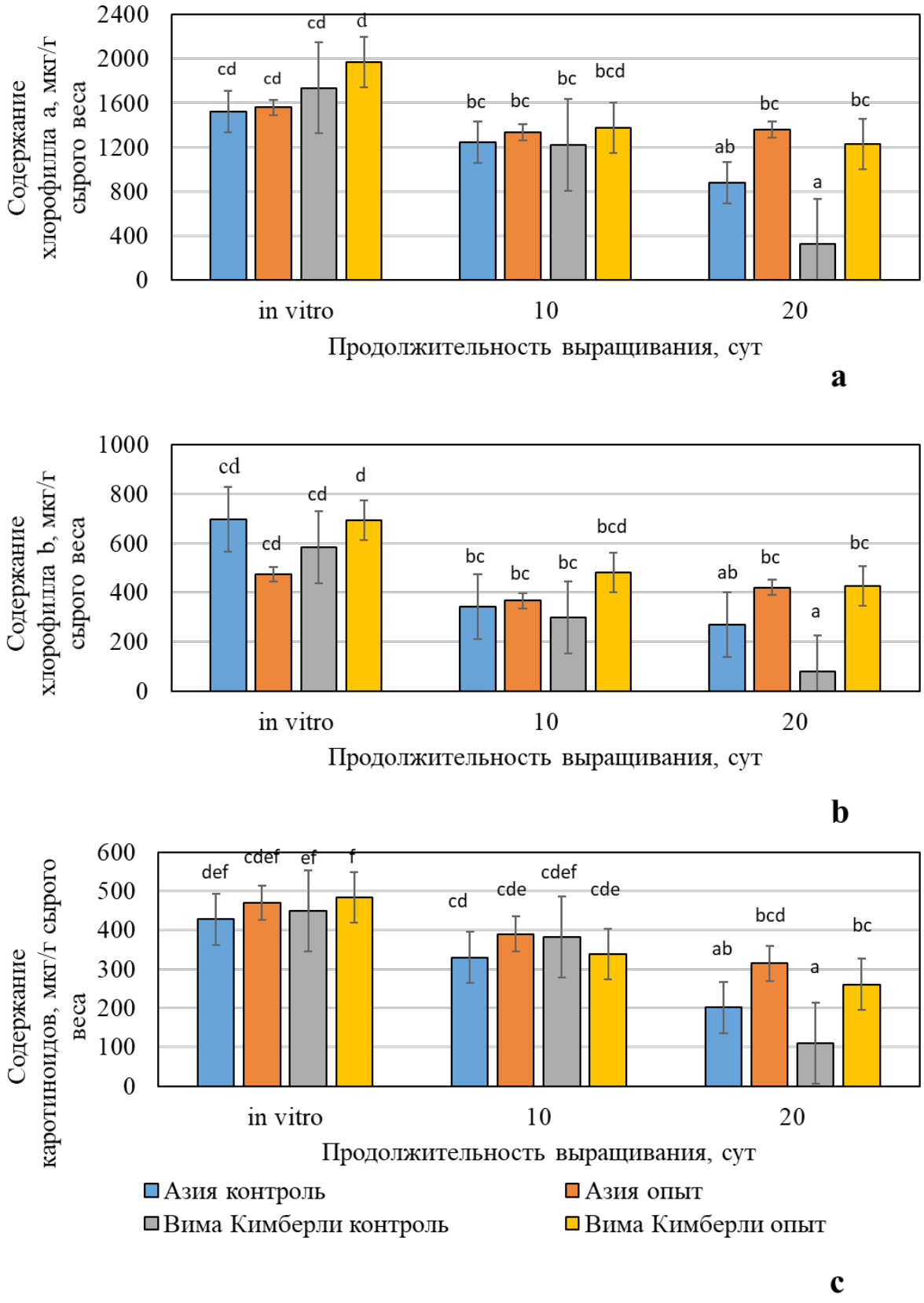


Рис. 2. Содержание фотосинтетических пигментов в листьях микрорастений земляники сортов 'Asia' и 'Vima Kimberly' в контроле и при инокуляции штаммами *Azospirillum baldaniorum* Sp245 и *Kocuria rosea* T1Ks19 (опыт) на различных этапах культивирования: a – содержание хлорофилла *a*; **b –** содержание хлорофилла *b*; **c –** содержание каротиноидов

Fig. 2. The content of photosynthetic pigments in the leaves of strawberry microplants of cvs. 'Asia' and 'Vima Kimberly' in the control variants and under inoculation with *Azospirillum baldaniorum* Sp245 and *Kocuria rosea* T1Ks19 strains (experiment) at different stages of cultivation: a – chlorophyll *a* content; **b** – chlorophyll *b* content; **c** – carotenoid content

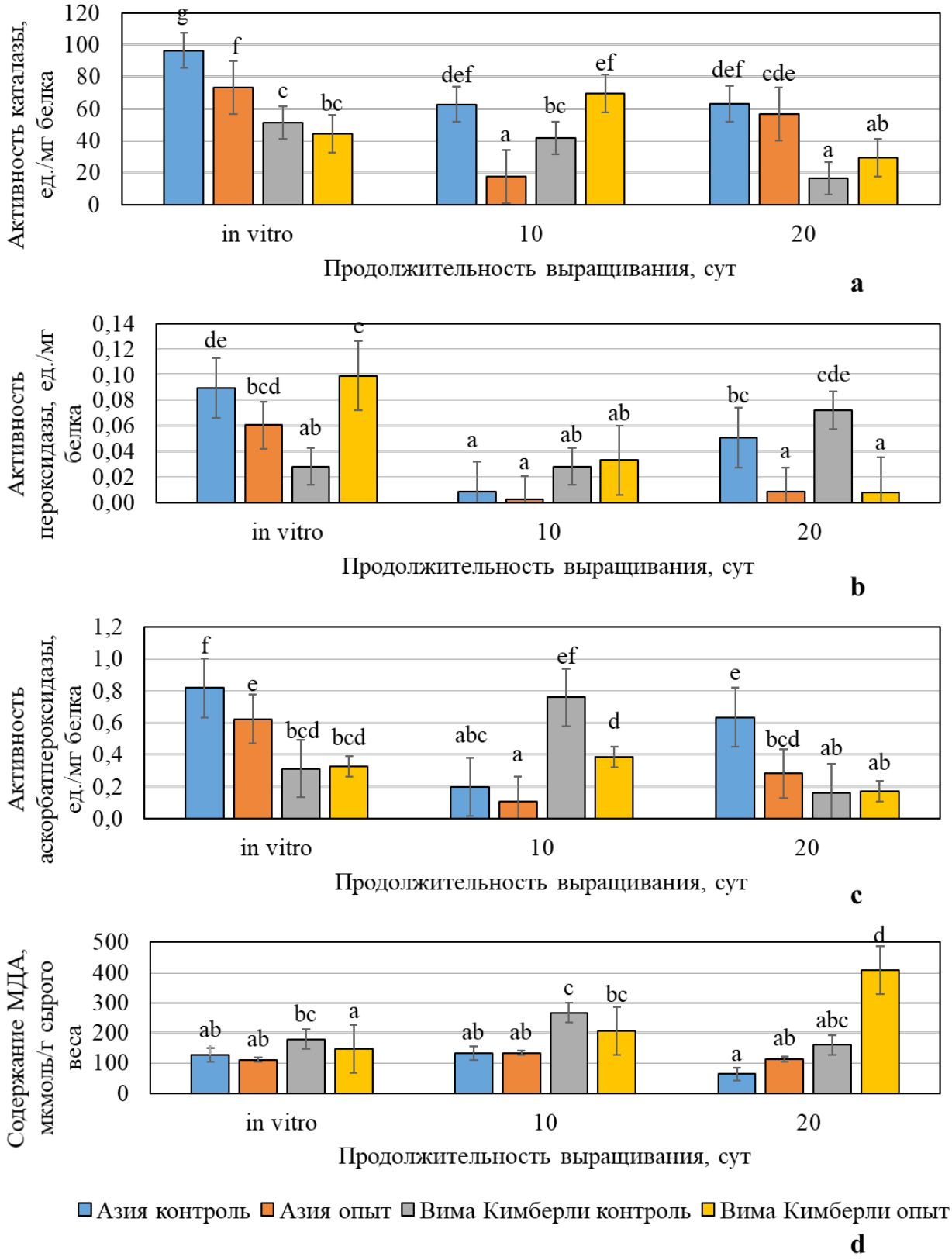


Рис. 3. Содержание антиоксидантных ферментов и малонового диальдегида (МДА) у микрорастений земляники сортов 'Asia' и 'Vima Kimberly' в контроле и при инокуляции бактериями *Azospirillum baldaniorum* Sp245 и *Kocuria rosea* T1Ks19 на различных этапах культивирования: a – активность каталазы; **b –** активность пероксидазы; **c –** активность аскорбатпероксидазы; **d –** содержание МДА

Fig. 3. The content of antioxidant enzymes and malondialdehyde (MDA) in strawberry microplants of cvs. 'Asia' and 'Vima Kimberly' in the control variants and under inoculation with *Azospirillum baldaniorum* Sp245 and *Kocuria rosea* T1Ks19 strains (experiment) at different stages of cultivation: a – catalase activity; **b** – activity peroxidase; **c** – ascorbate peroxidase activity; **d** – MDA content

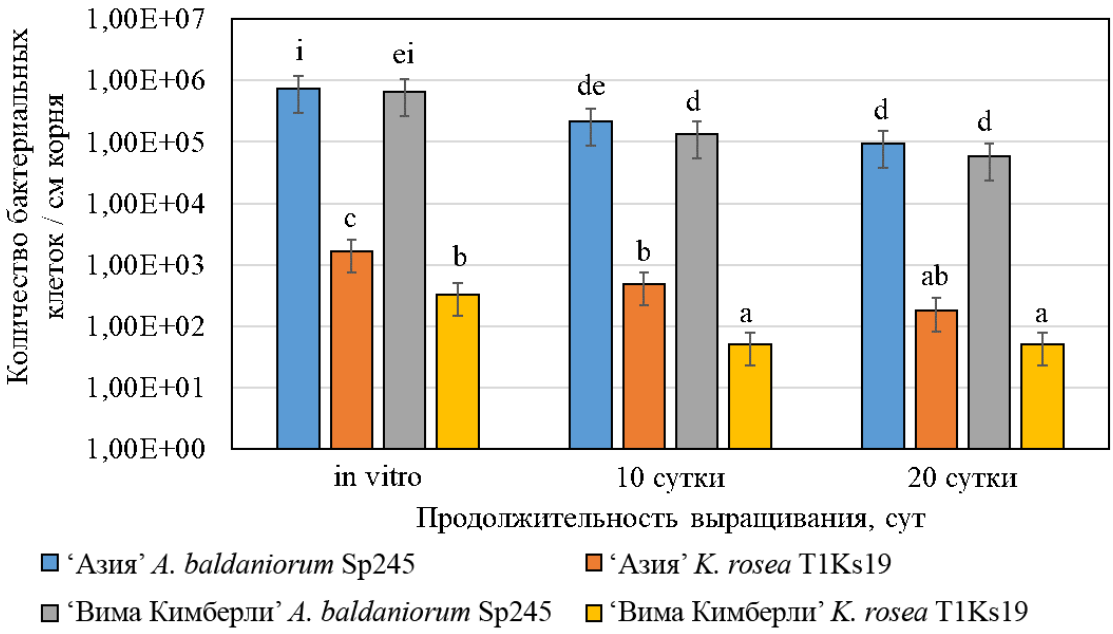


Рис. 4. Динамика содержания бактерий *Azospirillum baldaniorum* Sp245 и *Kocuria rosea* T1Ks19 на корнях земляники сортов ‘Asia’ и ‘Vima Kimberly’ *in vitro*, на 10-е и 20-е сутки *ex vitro*

Fig. 4. Dynamics of the content of *Azospirillum baldaniorum* Sp245 and *Kocuria rose* T1Ks19 bacteria on the roots of strawberry cvs. ‘Asia’ and ‘Vima Kimberly’ *in vitro*, and on the 10th and 20th days *ex vitro*

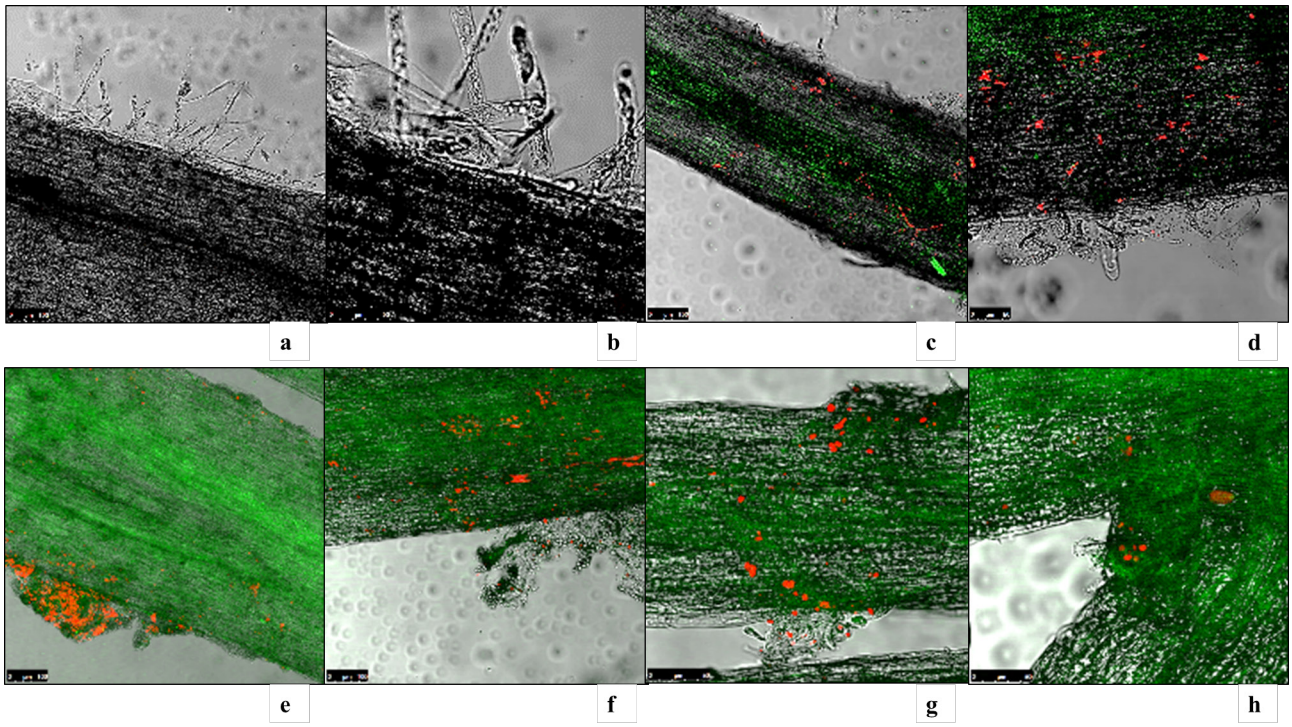


Рис. 5. Выявление бактерий на корнях микрорастений земляники сорта ‘Asia’ с использованием иммунофлуоресцентной микроскопии: a – контроль с антителами к *Azospirillum baldaniorum* Sp245; **b –** контроль с антителами к *Kocuria rosea* T1Ks19; **c –** опыт, нулевые сутки с антителами к *A. baldaniorum* Sp245; **d –** опыт, нулевые сутки с антителами к *K. rosea* T1Ks19; **e –** опыт, 10-е сутки с антителами к *A. baldaniorum* Sp245; **f –** опыт, 10-е сутки с антителами к *K. rosea* T1Ks19; **g –** опыт, 20-е сутки с антителами к *A. baldaniorum* Sp245; **h –** опыт, 20-е сутки с антителами к *K. rosea* T1Ks19

Fig. 5. Detection of bacteria on the roots of strawberry microplants of cv. ‘Asia’ using immunofluorescence microscopy: a – control with antibodies to *Azospirillum baldaniorum* Sp245; **b** – control with antibodies to *Kocuria rosea* T1Ks19; **c** – 0 days of the experiment with antibodies to *A. baldaniorum* Sp245; **d** – 0 days of the experiment with antibodies to *K. rosea* T1Ks19; **e** – 10th day of the experiment with antibodies to *A. baldaniorum* Sp245; **f** – 10th day of the experiment with antibodies to *K. rosea* T1Ks19; **g** – 20th day of the experiment with antibodies to *A. baldaniorum* Sp245; **h** – 20th day of the experiment with antibodies to *K. rosea* T1Ks19

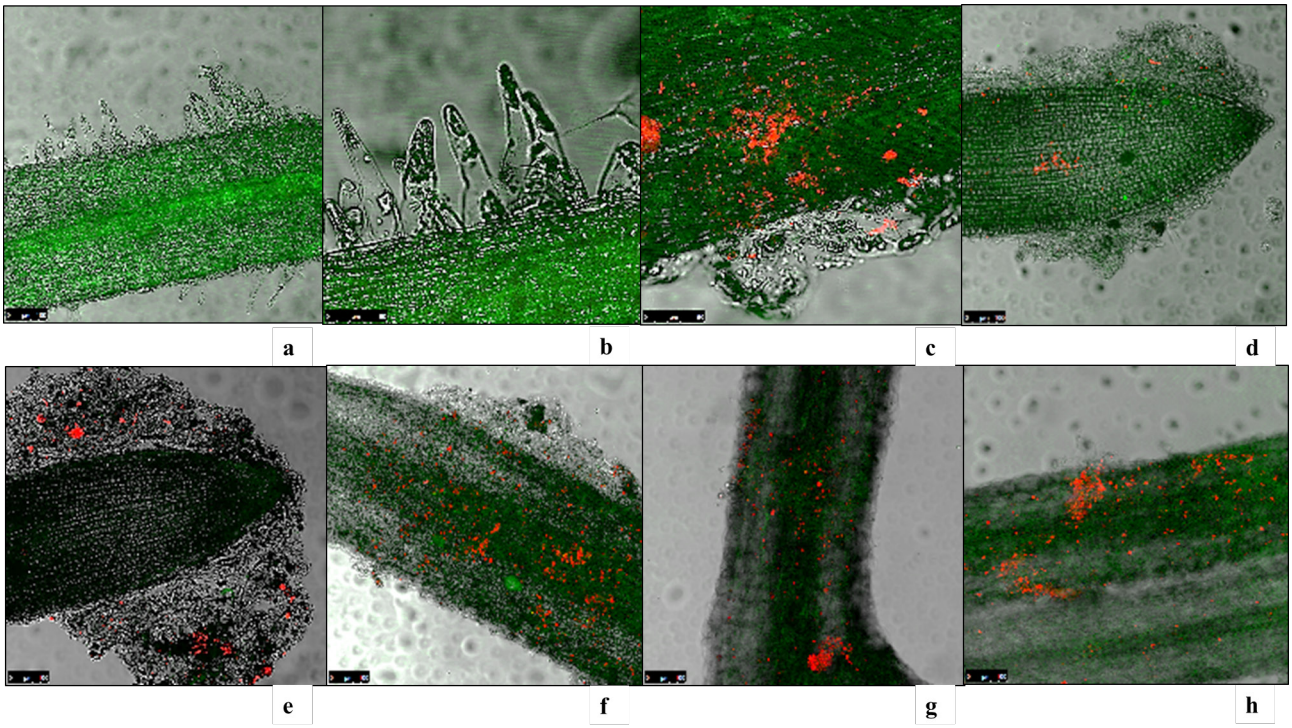


Рис. 6. Выявление бактерий на корнях микрорастений земляники сорта 'Vima Kimberly' с использованием иммунофлуоресцентной микроскопии: a – контроль с антителами к *Azospirillum baldaniorum* Sp245; **b –** контроль с антителами к *Kocuria rosea* T1Ks19; **c –** опыт, нулевые сутки с антителами к *A. baldaniorum* Sp245; **d –** опыт, нулевые сутки с антителами к *K. rosea* T1Ks19; **e –** опыт, 10-е сутки с антителами к *A. baldaniorum* Sp245; **f –** опыт, 10-е сутки с антителами к *K. rosea* T1Ks19; **g –** опыт, 20-е сутки с антителами к *A. baldaniorum* Sp245; **h –** опыт, 20-е сутки с антителами к *K. rosea* T1Ks19

Fig. 6. Detection of bacteria on the roots of strawberry microplants of cv. 'Vima Kimberly' using immunofluorescence microscopy: a – control with antibodies to *Azospirillum baldaniorum* Sp245; **b** – control with antibodies to *Kocuria rosea* T1Ks19; **c** – 0 days of the experiment with antibodies to *A. baldaniorum* Sp245; **d** – 0 days of the experiment with antibodies to *K. rosea* T1Ks19; **e** – 10th day of the experiment with antibodies to *A. baldaniorum* Sp245; **f** – 10th day of the experiment with antibodies to *K. rosea* T1Ks19; **g** – 20th day of the experiment with antibodies to *A. baldaniorum* Sp245; **h** – 20th day of the experiment with antibodies to *K. rosea* T1Ks19

нию с контрольными совпадает с данными других авторов (Paliwoda et al., 2022).

Установлено, что ризобактерии могут обладать свойствами, которые в стрессовых для растений условиях позволяют им эффективно колонизировать ризосферу растений, что обеспечивает обоим симбиотическим партнерам возможность поддерживать свой гомеостаз (Papadopoulou et al., 2022). По нашим данным, роль штаммов *A. baldaniorum* Sp245 и *K. rosea* T1Ks19 заключалась не столько в стимулировании ростовых процессов, сколько в регулировании редокс-статуса растений и уменьшении окислительного стресса в растениях, а как следствие – лучшей адаптации их к изменяющимся условиям среды культивирования.

Заключение

Проведенные нами исследования показали, что инокуляция *in vitro* растений земляники комбинацией штаммов *A. baldaniorum* Sp245 и *K. rosea* T1Ks19 не вызывает контаминацию среды культивирования. Более того, бактеризация повышает эффективность адаптации растений к условиям *ex vitro*, в том числе стабилизирует фотосинтетическую активность по сравнению с растениями, не инокулированными бактериями. Механизмом повышения адаптационной способности опытных микрорастений в условиях *ex vitro* может быть снижение уровня накопления малонового диальдегида, а также регулирование активности антиоксидантных ферментов каталазы и пероксидазы в листьях растений, что способствует понижению уровня окислительного стресса.

Перспективным направлением повышения эффективности производства оздоровленного материала земляники является инокуляция микрорастений земляники *in vitro* штаммами *A. baldaniorum* Sp245 и *K. rosea* T1Ks19 для повышения адаптационной способности растений к условиям гидропонной установки, а также разработка биопрепаратов на основе ризобактерий.

References / Литература

Arkhipova T.N., Evseeva N.V., Tkachenko O.V., Burygin G.L., Vysotskaya L.B., Akhtyamova Z.A. et al. Rhizobacteria inoculation effects on phytohormone status of potato microclones cultivated *in vitro* under osmotic stress. *Biomolecules*. 2020;10(9):1231. DOI: 10.3390/biom10091231

Burygin G.L., Kargapolova K.Yu., Kryuchkova Ye.V., Avdeeva E.S., Gogoleva N.E., Ponomaryova T.S. et al. *Ochrobactrum cytisi* IPA7.2 promotes growth of potato microplants and is resistant to abiotic stress. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2019;35(4):55. DOI: 10.1007/s11274-019-2633-x

Cantabella D, Dolcet-Sanjuan R, Teixidó N. Using plant growth-promoting microorganisms (PGPMs) to improve plant development under *in vitro* culture conditions. *Planta*. 2022;255(6):117. DOI: 10.1007/s00425-022-03897-0

Choi H.G. Correlation among phenotypic parameters related to the growth and photosynthesis of strawberry (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) grown under various light intensity conditions. *Frontiers in Plant Science*. 2021;12:647585. DOI: 10.3389/fpls.2021.647585

De Moura G., de Barros A., Machado F., da Silva C., Glienke C., Petters-Vandresen D.A.L. et al. The friend within: endophytic bacteria as a tool for sustainability in strawberry crops. *Microorganisms*. 2022;10(12):2341. DOI: 10.3390/microorganisms10122341

Dias A.C.F., Costa F.E.C., Andreote F.D., Lacava P.T., Teixeira M.A., Assumpção L.C., Araújo W.L., Azevedo J.L., Melo I.S. Isolation of micropropagated strawberry endophytic bacteria and assessment of their potential for plant growth promotion. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2009;25(2):189-195. DOI: 10.1007/s11274-008-9878-0

Guerrero-Molina M.F., Lovaisa N.C., Salazar S.M., Díaz-Ricci J.C., Pedraza R.O. Elemental composition of strawberry plants inoculated with the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense* REC3, assessed with scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray analysis. *Plant Biology (Stuttgart)*. 2014;16(4):726-731. DOI: 10.1111/plb.12114

Hazarika B.N., Teixeira da Silva J.A., Talukdar A. Effective acclimatization of *in vitro* cultured plants: Methods, physiology and genetics. In: J.A. Teixeira da Silva (ed.). *Floriculture, Ornamental and Plant Biotechnology. Vol. 2*. Bexhill-On-Sea: Global Science Books; 2006. p.427-438.

IBPPM RAS Collection of Rhizosphere Microorganisms: [website]. Available from: http://collection.ibppm.ru [accessed Aug. 17, 2024].

Kargapolova K.Yu., Burygin G.L., Tkachenko O.V., Evseeva N.V., Pukhalskiy Ya.V., Belimov A.A. Effectiveness of inoculation of *in vitro*-grown potato microplants with rhizosphere bacteria of the genus *Azospirillum*. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 2020;141(2):351-359. DOI: 10.1007/s11240-020-01791-9

Kha T.Z., Kanarskii A.V., Kanarskaia Z.A., Shcherbakov A.V., Shcherbakova E.N. The key plant growth stimulator – rhizobacteria. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature management*. 2020;3(47):58-73. [in Russian] (Ха Т.З., Канарский А.В., Канарская З.А. Щербаков А.В., Щербакова Е.Н. Ключевой стимулятор роста растений – ризобактерии. *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование*. 2020;3(47):58-73). DOI: 10.25686/2306-2827.2020.3.58

Liu S., Strauss S., Adibi M., Mosca G., Yoshida S., Dello Ioio R. et al. Cytokinin promotes growth cessation in the *Arabidopsis* root. *Current Biology*. 2022;32(9):1974-1985.e3. DOI: 10.1016/j.cub.2022.03.019

Madhavi B.G.K., Kim N.E., Basak J., Choi G.M., Kim H.T. Comparative study of strawberry growth and fruit quality parameters in horizontal and vertical production systems. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*. 2023;64(2):409-419. DOI: 10.1007/s13580-022-00494-8

Matora L.Yu., Shvartsburd B.I., Shchegolev S.Yu. Immunochemical analysis of O-specific polysaccharides from the soil nitrogen-fixing bacterium *Azospirillum brasilense*. *Microbiology (Moscow)*. 1998;67(6):677-681.

Mynett K., Podwyszyńska M., Derkowska E., Górnik K., Sas-Paszt L., Wojtania A. Effect of biologically active TotalHumus® and Bacterbase on the growth *ex vitro* of strawberry, blueberry and hip rose microcuttings. *Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus*. 2022;21(6):7-20. DOI: 10.24326/asphc.2022.6.1

Naing A.H., Kim S.H., Chung M.Y., Park S.K., Kim C.K. *In vitro* propagation method for production of morphologically and genetically stable plants of different strawberry cultivars. *Plant Methods*. 2019;15:36. DOI: 10.1186/s13007-019-0421-0

Orlikowska T., Nowak K., Reed B.M. Bacteria in the plant tissue culture environment. *Plant Cell Tissue and Organ Culture*. 2017;128(3):487-508. DOI: 10.1007/s11240-016-1144-9

Paliwoda D., Mikiciuk G., Mikiciuk M., Kisiel A., Sas-Paszt L., Miller T. Effects of rhizosphere bacteria on strawberry plants (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) under water deficit. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022;23(18):10449. DOI: 10.3390/ijms231810449

Papadopoulou A., Matsi T., Kamou N., Avdouli D., Mellidou I., Karamanoli K. Decoding the potential of a new *Pseudomonas putida* strain for inducing drought tolerance of tomato (*Solanum lycopersicum*) plants through seed biopriming. *Journal of Plant Physiology*. 2022;271:153658. DOI: 10.1016/j.jplph.2022.153658

Sokolova E.A., Mishukova O.V., Hlistun I.V., Tromenschleger I.N., Tikunov A.Y., Manakhov A.D. et al. The effectiveness of co-inoculation by consortia of microorganisms depends on the type of plant and the soil microbiome. *Plants (Basel)*. 2023;13(1):116. DOI: 10.3390/plants13010116

Soumare A., Diédhiou A.G., Arora N.K., Al-Ani L.K.T., Ngom M., Fall S. et al. Potential role and utilization of plant growth promoting microbes in plant tissue culture. *Frontiers in Microbiology*. 2021;12:649878. DOI: 10.3389/fmicb.2021.649878

State Variety Commission. Catalogue of Breeding Achievements: [website]. [in Russian] (Госсорткомиссия. Каталог селекционных достижений: [сайт]). URL: https://gossortrf.ru/registry/ [дата обращения: 10.02.2025].

Stepanov V.V., Moskovenko N.V. Study of the indicators of the quality of the landscape of gardening drinked by microcloton biotechnology. *Scientific Works of the Kuban State Technological University*. 2016;(14):621-628. [in Russian] (Степанов В.В., Московенко Н.В. Изучение показателей качества земляники садовой, выращенной путем биотехнологии микроклонирования. *Научные труды Кубанского государственного технологического университета*. 2016;(14):621-628). URL: https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0035/1487.pdf [дата обращения: 03.02.2025]

Tkachenko O.V., Evseeva N.V., Kargapolova K.Yu., Denisova A. Yu., Burygin G.L., Pozdnyakova N.N. et al. Application of rhizobacteria *Azospirillum baldaniorum* Sp245 and *Kocuria rosea* T1Ks19 to increase the efficiency of potato cultivation in aeroponics. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2023a;70(8):190. DOI: 10.1134/S1021443723602276

Tkachenko O.V., Evseeva N.V., Kargapolova K.Yu., Denisova A. Yu., Pozdnyakova N.N., Kulikov A.A. et al. Increased activity of the pro/antioxidant system of potato microplants by rhizospheric bacteria in aeroponics conditions. *The Agrarian Scientific Journal*. 2023b;(3):65-72. [in Russian] (Ткаченко О.В., Евсеева Н.В., Каргаполова К.Ю. и др. Повышение активности про/антиоксидантной системы микрорастений картофеля ризосферными бактериями в условиях аэропоники. *Аграрный научный журнал*. 2023b;(3):65-72). DOI: 10.28983/asj.y2023i3pp65-72

Tkachenko O.V., Evseeva N.V., Terentyeva E.V., Burygin G.L., Shirokov A., Burov A.M. et al. Improved pro-

duction of high-quality potato seeds in aeroponics with plant-growth-promoting rhizobacteria. *European Potato Journal*. 2021;64(1):55-66. DOI: 10.1007/s11540-020-09464-y

Vicente-Hernández A., Salgado-Garciglia R., Valencia-Cantero E., Ramírez-Ordorica A., Hernández-García A., García-Juárez P. et al. *Bacillus methylotrophicus* M4-96 stimulates the growth of strawberry (*Fragaria × ananassa* 'Aromas') plants *in vitro* and slows *Botrytis cinerea* infection by two different methods of interaction. *Journal of Plant Growth Regulation*. 2019;38(3):765-777. DOI: 10.1007/s00344-018-9888-6

Wang K., He W., Ai Y., Hu J., Xie K., Tang M. et al. Optimizing seed potato production by aeroponics in China. *Philippine Journal of Crop Science*. 2017;42(1):69-74.

Wellburn A.R. The spectral determination of chlorophylls *a* and *b*, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *Journal of Plant Physiology*. 1994;144(3):307-313. DOI: 10.1016/S0176-1617(11)81192-2

Информация об авторах

Артем Алексеевич Куликов, аспирант, Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, 410012 Россия, Саратов, пр. им. Петра Столыпина, 4, стр. 3, artyomka.net@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1728-8229

Оксана Викторовна Ткаченко, кандидат сельскохозяйственных наук, заведующая кафедрой, Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, 410012 Россия, Саратов, пр. им. Петра Столыпина, 4, стр. 3, oktkachenko@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-8327-6763

Нина Васильевна Евсеева, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Саратовский научный центр Российской академии наук», Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов – обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра «Саратовский научный центр Российской академии наук», 410049 Россия, Саратов, пр. Энтузиастов, 13, evseeva_n@ibppm.ru, https://orcid.org/0000-0002-3973-6766

Кристина Юрьевна Каргаполова, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, 410012 Россия, Саратов, пр. им. Петра Столыпина, 4, стр. 3, kinaschchri@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-6040-9401

Алена Юрьевна Денисова, ассистент, Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, 410012 Россия, Саратов, пр. им. Петра Столыпина, 4, стр. 3, alena.denisova1408@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-6789-7666

Наталья Николаевна Позднякова, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Саратовский научный центр Российской академии наук», Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов – обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра «Саратовский научный центр Российской академии наук», 410049 Россия, Саратов, пр. Энтузиастов, 13, Pozdnyakova_n@ibppm.ru, https://orcid.org/0000-0002-0505-4628

Геннадий Леонидович Бурыгин, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Саратовский научный центр Российской академии наук», Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов – обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра «Саратовский научный центр Российской академии наук», 410049 Россия, Саратов, пр. Энтузиастов, 13, доцент, Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, 410012 Россия, Саратов, пр. им. Петра Столыпина, 4, стр. 3, burygingl@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8031-9641

Александр Александрович Широков, кандидат биологических наук, руководитель Центра коллективного пользования, Федеральный исследовательский центр «Саратовский научный центр Российской академии наук», Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов – обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра «Саратовский научный центр Российской академии наук», 410049 Россия, Саратов, пр. Энтузиастов, 13, shirokov_a@ibppm.ru, https://orcid.org/0000-0003-4321-735X

Information about the authors

Artem A. Kulikov, Postgraduate Student, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, 4, bldg 3, Petra Stolypina Ave., Saratov 410012, Russia, artyomka.net@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1728-8229

Oksana V. Tkachenko, Cand. Sci. (Agriculture), Head of a Department, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, 4, bldg 3, Petra Stolypina Ave., Saratov 410012, Russia, oktkachenko@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-8327-6763

Nina V. Evseeva, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Saratov Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms – a separate structural subdivision of Saratov Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, 13 Entuziastov Ave., Saratov 410049, Russia, evseeva_n@ibppm.ru, https://orcid.org/0000-0002-3973-6766

Kristina Yu. Kargapolova, Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, 4, bldg 3, Petra Stolypina Ave., Saratov 410012, Russia, kinaschchri@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-6040-9401

Alena Yu. Denisova, Assistant Professor, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, 4, bldg 3, Petra Stolypina Ave., Saratov 410012, Russia, alena.denisova1408@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-6789-7666

Natalia N. Pozdnyakova, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, Saratov Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms – a separate structural subdivision of Saratov Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, 13 Entuziastov Ave., Saratov 410049, Russia, Pozdnyakova_n@ibppm.ru, https://orcid.org/0000-0002-0505-4628

Gennady L. Burygin, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Saratov Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms – a separate structural subdivision of Saratov Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, 13 Entuziastov Ave., Saratov 410049, Russia, Associate Professor, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, 4, bldg 3, Petra Stolypina Ave., Saratov 410012, Russia, burygingl@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8031-9641

Alexander A. Shirokov, Cand. Sci. (Biology), Head of the Center for Collective Use, Saratov Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms – a separate structural subdivision of Saratov Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, 13 Entuziastov Ave., Saratov 410049, Russia, shirokov_a@ibppm.ru, https://orcid.org/0000-0003-4321-735X

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 16.02.2025; одобрена после рецензирования 17.06.2025; принята к публикации 09.07.2025.
The article was submitted on 16.02.2025; approved after reviewing on 17.06.2025; accepted for publication on 09.07.2025.

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article
UDC 636.086.15; 631.527
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-92-101

CC BY

Variability of grain color parameters among local maize cultivars in Azerbaijan

Halima R. Mammadova[1], Eduard B. Khatefov[2], Remzi Ekinci[3]

[1] *Research Institute of Crop Husbandry, Baku, Azerbaijan*

[2] *N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia*

[3] *Dicle University, Diyarbakir, Turkey*

Corresponding author: Halima R. Mammadova, helime0101@gmail.com

Background. Aleurone and pericarp pigments in maize grain are regulated by the content of anthocyanins, carotenoids, tocopherols, and their various combinations, which determines their nutraceutical and coloring properties. Searching for sources of natural dyes to replace synthetic ones becomes increasingly popular and contributes to the development of hybrid maize breeding for food and dye production.

Materials and methods. A comprehensive study of Azerbaijani germplasm was used to select 112 diverse maize accessions and evaluate them for grain color. There were 5 blocks of study, conducted in two agroclimatic zones (Zaqatala in 2013, and Baku in 2014). The grain color gamut parameters were analyzed in the CIELAB system using the luminance coordinates (L* = 0 for dark, and L* = 100 for bright). The a* coordinate denoted red/green, with +a* for red, and –a* for green, and the b* coordinate denoted yellow/blue, with +b* for yellow, and –b* for blue. The hue angle and color in the a*b* plane were also measured.

Results. Five clusters with a wide grain color diversity were identified during the study of local maize accessions. The color intensity variation in the studied set was within the range of 42.36–66.49, the red/green values within 5.32–15.93, the blue/yellow values within 18.07–44.40, the color values in the a*b* plane within 18.98–46.12, and the hue angle values within 62.50–80.14. The ranking of colors into 5 clusters showed that 96 were concentrated in the 1st cluster, with the color brightness value of 58.16, the red/green value (a*) of 10.45, and the blue/yellow value (b*) of 32.82. Besides, the color value in the a*b* plane was 34.48, and the hue in the a*b* plane was 72.41. Some correlations were found between grain color and morphometric characters, and grain biochemistry.

Conclusion. The Azerbaijani local maize collection exhibits a wide diversity for the inbreeding of lines with various grain colors, promising for hybrid maize breeding.

***Keywords*:** *Zea mays* L., clustering, diversity, CIELAB color system, hybrid maize breeding

Acknowledgments: this study was produced from Halima R. Mammadova's PhD thesis on "Selection and genetic certification of promising varieties and lines of corn with economically valuable characteristics, adapted to the conditions of Azerbaijan"; the studies were conducted within the framework of the theme plan of VIR, Project No. FGEM-2023-0003 "Developing new breeding forms of maize with biotechnology methods", in the context of assessing the quality of seed source material in Russia, and Project No. FGEM-2022-0009 "Structuring and disclosing the potential of hereditary variation in the global collection of cereal and groat crops at VIR for the development of an optimized genebank and its sustainable utilization in plant breeding and crop production", in the context of reproduction and conservation of the breeding material of maize.
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Mammadova H.R., Khatefov E.B., Ekinci R. Variability of grain color parameters among local maize cultivars in Azerbaijan. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(3):92-101. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-92-101

© Mammadova H.R., Khatefov E.B., Ekinci R., 2025

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-92-101

Изменчивость параметров цвета зерна местных сортов кукурузы Азербайджана

Х. Р. Мамедова[1], Э. Б. Хатефов[2], Р. Экинджи[3]

[1] *Научно-исследовательский институт земледелия, Баку, Азербайджан*

[2] *Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия*

[3] *Университет Диджле, Диярбакыр, Турция*

Автор, ответственный за переписку: Халима Рафиз-кызы Мамедова, helime0101@gmail.com

Актуальность. Окраска пигментами алейрона и перикарпия зерновки кукурузы определяется содержанием в них антоцианов, каротиноидов, токоферолов и их различным сочетанием, что определяет как нутрицевтические, так и красящие свойства. Поиск источников натуральных красителей для замещения синтетических набирает популярность, способствуя развитию селекции гибридной кукурузы для производства продуктов питания и красителей.
Материалы и методы. На основе комплексного исследования в зародышевой плазме Азербайджана собрали 112 различных образцов кукурузы и оценили их по признаку цвета зерновки. Исследование проводилось в 5 блоках в 2 агроклиматических зонах (Загатала в 2013 г. и Баку в 2014 г.). Изучали параметры цветовой гаммы зерна в системе CIELAB в координате яркости (L* = 0 обозначает темный, L* = 100 – яркий): a* – координата красного/зеленого (+a* обозначает красный, –a* – зеленый), b* – координата желтого/синего (+b* обозначает желтый, –b* – синий), а также угол оттенка и цвет в плоскости a*b*.
Результаты. При исследовании отобранных образцов по признаку «цвет зерна» выявлено 5 кластеров, характеризующихся большим разнообразием окраски зерновки. Варьирование в выборке интенсивности цвета находится в пределах 42,36–66,49, значения красного/зеленого – 5,32–15,93, значения синего/желтого – 18,07–44,40, значения цвета в плоскости a*b* – 18,98–46,12, значение угла оттенка – 62,50–80,14. Ранжирование цветности по 5 кластерам показало, что 96 сосредоточены в 1-м кластере со значением яркости цвета 58,16, значением a* (красный/зеленый) 10,45 и значением b* (синий/желтый) 32,82. Значение цвета в плоскости a*b* составило 34,48, а оттенка в плоскости a*b* – 72,41. Выявлены некоторые корреляции между окраской зерна, морфометрическими признаками и биохимическим составом зерновки.
Заключение. Коллекция образцов местных сортов кукурузы Азербайджана обладает широким разнообразием для инбредирования линий с различной окраской зерна с целью их вовлечения в гибридную селекцию кукурузы.

Ключевые слова: *Zea mays* L., кластеризация, разнообразие, цветовая система CIELAB, гибридная селекция кукурузы

Благодарности: исследование проведено в рамках диссертационной работы Х. Р. Мамедовой «Селекционно-генетическая паспортизация перспективных по хозяйственно ценным признакам сортов и линий кукурузы, адаптированных к условиям Азербайджана»; исследования выполнены в рамках тематического плана ВИР по проекту FGEM-2023-0003 «Создание новых селекционных форм кукурузы с использованием методов биотехнологии» в части оценки качества исходного семенного материала в России, а также FGEM-2022-0009 «Структурирование и раскрытие потенциала наследственной изменчивости мировой коллекции зерновых и крупяных культур ВИР для развития оптимизированного генбанка и рационального использования в селекции и растениеводстве» в части размножения и сохранения селекционного материала кукурузы.
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Мамедова Х.Р., Хатефов Э.Б., Экинджи Р. Изменчивость параметров цвета зерна местных сортов кукурузы Азербайджана. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(3):92-101. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-92-101

Introduction

In terms of production area, the most cultivated cereal plant in the world after wheat and rice in the family of Poaceae is maize (Vartanli, Emeklier, 2007). Maize has many different areas of utilization and serves as raw material for many sectors. It is used primarily in direct human nutrition, as green grass or silage, in the feed industry, in starch or starch-based products, in oil production, and also constitutes the raw material of many products (Öktem, Toprak, 2013).

World maize production was estimated to be 1,157 million tons in the 2022/2023 marketing year, 67 million tons below the previous period. Its total domestic use reached 1,197 million tons, and exports were 181 million tons. While the average maize price on international markets is $ 278,9/ton, the range of change within the marketing year is very wide. China has the largest share in the world's maize cultivation area (over 198 million hectares), with the cultivation area exceeding 41 million hectares. The USA, with 33 million hectares, has about 20% less acreage than China, but it has become the world's largest maize producer with its high yields. In the last five marketing years, the global average maize yield was between 5.6 and 6.0 t/ha, but in certain countries, such as the USA and Turkey, this figure can reach 11 t/ha. One of the nations that has raised its output in Asia recently is India. Due to higher yields and larger area, India's maize output grew from about 29 million tons in 2019–2020 to 31.6 in 2020–2021. According to FAO and USDA figures, global maize output increased by 3.7% and 8%, respectively, making 2021/2022 the marketing year when the 1.2 billion ton maximum was surpassed. The major contributors to this surge were the United States, Argentina, China, Ukraine, and the European Union (TEPGE yayin…, 2023).

With its rich assortment, versatility, and product efficiency, maize is a significant agricultural plant worldwide: 27% of the world's maize production is utilized for human food, while 73% is used for animal feed. In developed countries, 10% of the maize produced by industrialized nations is utilized for human consumption and industry, whereas 90% is used for feeding animals (Öz et al., 2017). One of the major cereal crops, maize has oil content of 3.5–5.5%. Even though maize (*Zea mays* spp.) is not considered an oil crop, corn oil is widely used in industry and human nutrition worldwide. For this reason, increasing the oil content has become one of the important goals of maize breeders. High-oil maize (also known as High-Oil Corn, HOC) is defined as genotypes having grain oil content of more than 6% (Dumanovic, 1995; Wang et al., 2012).

Negative correlations were found between oil content and carbohydrate content, and positive correlations with protein content in some investigations (Kahriman et al., 2017). Therefore, it is essential to look at the changes in the characteristics in question and track the relationships between the features in breeding research that aims to improve oil content.

Maize grains' high carbohydrate (73%), protein (9%) and oil (4%) contents are the primary sources of their economic and nutritional worth (Özdemir, Sade, 2019). Maize is renowned for its diverse range of grain colors. The United Nations Bio-Trade Facilitation Program reports that between 1998 and 2002 the commerce in purple maize grew by around 467%. In Germany, France, Italy, and Japan, purple maize is very commonly used as a natural colorant. Anthocyanins, the main compound of purple maize, reduce the risk of cardiovascular diseases, obesity, diabetes, cancer, and some chronic diseases (Lao et al., 2017).

L*a*b* color values are a coordinate system where each color is represented by a single point, just like in the geographic coordinate system (latitude, longitude, and altitude). Therefore, three components (color coordinate values) are required to define each color in the color space. L, a*, b* color values are the most commonly used method for measurement and color communication. L, a*, b* values are designed to be close to human eye perception (Kırca, 2020).

The aim of this research was to characterize, classify and compare maize varieties and types (genotypes) in Azerbaijani germplasm according to color parameters, to help in the evaluation of corn cultivars according to their characteristics and enable their use in plant breeding investigations.

Materials and methods

This research used the germplasm population obtained from our previous study on the maintenance of homozygous single-plant maize lines. The plant material of 112 genotypes was used in the investigation; the information on the material is given in Table 1. In 2011, the material was acquired from the Genetic Resources Institute of the Azerbaijan National Academy of Sciences.

The research was conducted in Azerbaijan: Zaqatala in 2013, and Baku in 2014, in two different agroecological environments. Planting took place on April 15, 2013, in Zaqatala, and on April 18, 2014, in Baku. Harvesting occurred on September 20, 2013, in Zaqatala, and on September 25, 2014, in Baku. Grain samples were collected from ears grown under isolated conditions. Utilizing parchment isolators, controlled pollination was carried out on homozygous plants to avoid cross-contamination from foreign pollen among various accessions. The trial was conducted in 5 blocks in an extended experimental design. The plots were arranged in 2 rows, 6 m long, with the planting density of 70 × 20 cm (each plot was 8.4 m^2). Fertilization was carried out with 18 kg of pure nitrogen, 8 kg of pure phosphorus, and 5 kg of potassium per decare (1 decare (da) = 1000 m^2). The climatic data for Zaqatala (2013) and Baku (2014) were favorable for the maize harvest. Baku is a city located at the Caspian Sea, with four distinct seasons. The climate is generally hot, with dry summers and mild winters. The summer months (June, July, and August) are the warmest: temperatures frequently rise beyond 30°C. The weather is usually sunny and dry. The winter months (December, January, and February) are the coldest, with mean temperatures above 0°C. The transitional seasons, spring and autumn, provide more precipitation and warmer temperatures. Zaqatala has a mild, humid climate. Summers are cool and rainy, while winters are snowy and cold. Since the region is located at the foot of the Caucasus Mountains, topographic features also affect the climate. While winters are colder and snowier at higher altitudes, the climate in lower areas is milder. In 2013, precipitation in Zaqatala was generally quite low, but sometimes there was a sudden high value. The number of rainy days may have increased, especially in spring and autumn. It can be estimated that temperatures are close to the mean (+30°C) or slightly lower in the summer months, and at normal levels (+2°C) in the winter months. However, sharp temperature drops and cold waves were observed (https://www.meteoblue.com/en/weather/historyclimate/climatemodelled/zaqatala_azerbaijan_584596). After harvesting, 10 ears were randomly selected from each plot and the following parameters were calculated. Such indicators as the L value, a* value, b* value, chroma value, and hue angle were analyzed in the research (Beetsma, 2024). The color analysis was performed using a HunterLab Color Flex EZ

Table 1. **List of maize accessions used in the research**

Таблица 1. **Список образцов кукурузы, использованных в исследовании**

Description of the component composition of accessions / Характеристика компонентного состава образцов	Number of accessions / Число образцов	
	pieces / единиц	%
Number of maize accessions studied	112	100
Accession's subspecies/variety assignment:		
Zea mays subsp. *indentata:*	112	100
var. *vulgata*	1	0.89
var. *flavodulcis*	1	0.89
var. *flavorubra*	88	78.57
var. *leukodon*	4	3.57
var. *poikilodon*	2	1.78
var. *rubropaleata*	4	3.57
var. *xantodon*	10	8.92
var. *alboapicularis*	2	1.78
Country of origin:		
Azerbaijan	93	83.03
Russia	9	8.03
CIMMYT	7	6.25
Georgia	2	1.76
Yugoslavia	1	0.89
Source:		
AHM	28	25.00
EHM	15	13.39
UGSH	69	61.60

spectrophotometer at the Physiology Laboratory of the Faculty of Agriculture, Dicle University. Maize kernels were measured for L*a*b* values using the Color Flex EZ calibrated with standard white and black plates. The luminance value (L*) defines a measurement that depends on the ability of the observed object to transmit or reflect light. When comparing color values, they can be grouped as lighter or darker. L*, the luminance coordinate (L* = 0 means black, and L* = 100 means white): a* is the red/green coordinate, +a* means red, –a* means green; b* is the yellow/blue coordinate, +b* means yellow, –b* means blue (Fig. 2). The chroma (using equation 1) and hue angle (using equation 2) values were obtained by calculating the a* and b* values.

The values of chroma (using Eq1.) and hue angle (using Eq2.) were calculated according to the formulae:

$$\text{Chroma_Value} = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \qquad \text{Eq1.}$$

$$\text{Hue_Angle} = \tan^{-1}\left[\frac{b}{a}\right] \qquad \text{Eq2.}$$

Colors are categorized and named using the hue angle, which indicates the apparent color of an item. It is defined according to the position of a color within the color space relative to the primary colors: red, green, and blue. Specifically, the hue angle of 0° corresponds to red, 90° to yellow, 180° to green, and 270° to blue (Fig. 3).

In visual perception, chroma – also known as color intensity, or clarity – denotes how pure a color is. It defines how

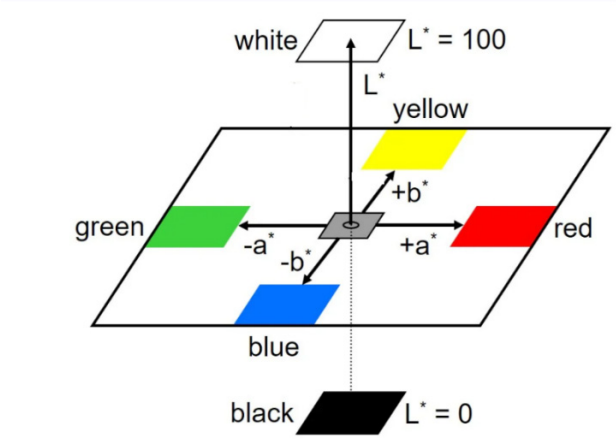


Fig. 1. **CIELAB Color System in the L*, a* and b* plane** (from Kettler et al., 2016)

Рис. 1. **Цветовая система CIELAB в плоскости L*, a*, b*** (по: Kettler et al., 2016)

vivid or dull a color appears and indicates the extent to which a color deviates from gray or a neutral tone. The distance from the vertical (luminance) axis, which represents the color's saturation level, is how chroma is assessed in the color space. It provides insight into changes in color saturation without altering the direction of lightness or darkness (Fig. 1, 2).

Descriptive statistics of the data obtained as a result of investigating color trait characteristics employed such indicators as the minimum value, maximum value, and mean values, such methods as correlation analysis, principal component analysis, and cluster analysis (UPGMA, the Unweighted Pair Group Method using Arithmetic Average), and a dendrogram using the JMP Pro 17.0.0 (Copyright © 2022, Statistical Discovery LLC) statistical software package (https://www.jmp.com/en/home). The extent to which the constructed dendrogram represented the similarity matrix was tested with Mantel's matrix correspondence test (Mantel, 1967). As a result of this test, the cophenetic correlation coefficient (r* value) was obtained. The same similarity matrix was used for the principal coordinate analysis, and the distributions of the genotypes on the obtained principal coordinates were determined

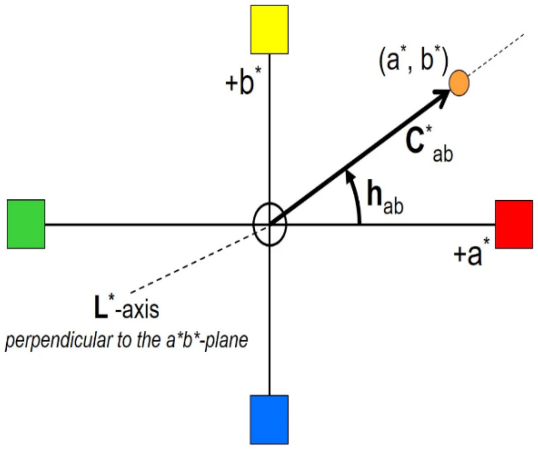


Fig. 2. Hue angle and chroma in the a*b* plane (from Kettler et al., 2016)
Рис. 2. Угол оттенка и цвета в плоскости a*b* (по: Kettler et al., 2016)

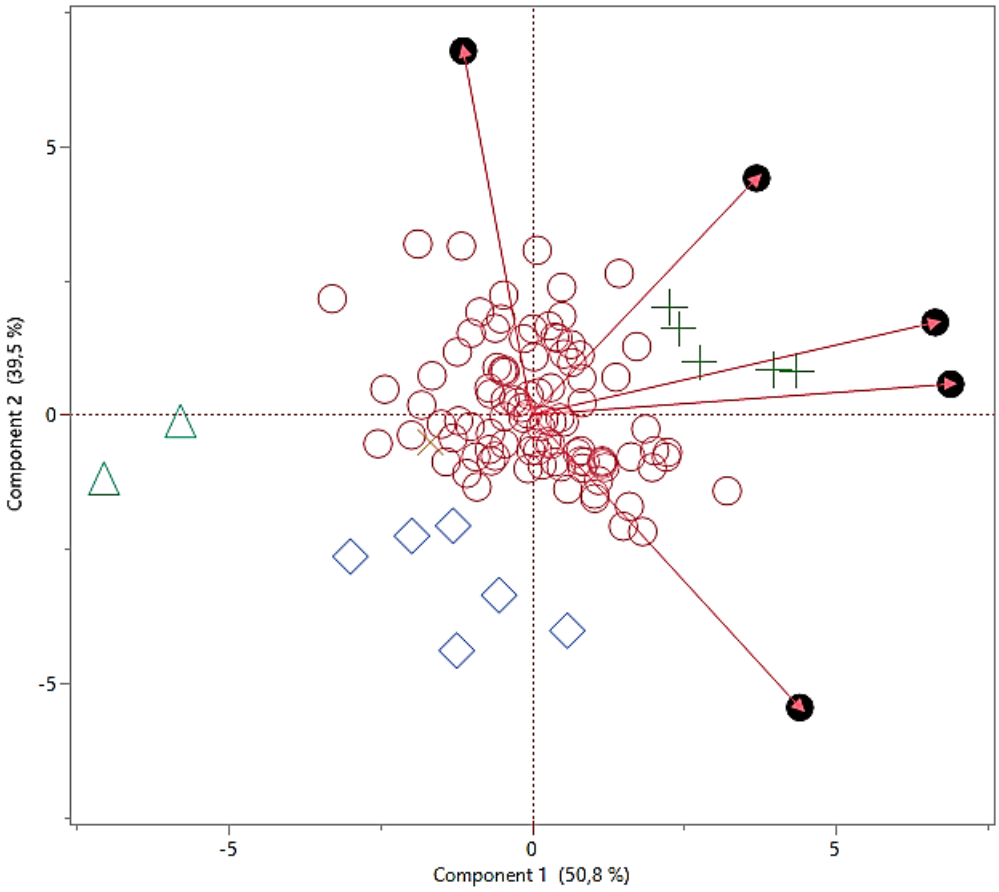


Fig. 3. Distribution obtained with PC1 and PC2
Рис. 3. Распределение, полученное с помощью PC1 и PC2

graphically. Grain nutrient content traits (oil, protein, starch, cellulose, and ash content), yield traits (grain yield, 1000-kernel weight, hectoliter weight, weight of seed per ear, and number of seeds per ear), and morphological traits (plant height, ear height, leaf length, leaf width, leaf area, and ear length) were analyzed using pairwise correlation analyses. The description of phenotypic characteristics is given according to the classification of UPOV (2009),

Results and discussion

The L* value (luminance): The L values of the maize accessions varied within the range of 42.36–66.49, and the mean value was 57.48 ± 0.28. It was observed that the accessions showed low variation in terms of the L value of grain (Table 2). When researching the L* values in the grain of the accessions, the L* values of the AHM-481, AHM-484 and EHM-209 genotypes exceeded 65, while the L value of 95.58% (107 pcs.) of the population was equal or higher than 50. The L* values of the EHM-245, UGSH-167, UGSH-168, UGSH-175 and UGSH-291 genotypes were determined to be less than 50. As a result of the correlation analysis on the investigated genotypes, a positive correlation (r = +0.27**) w0as found between the L value and the 1000-kernel weight. Statistically significant correlations were identified between the L value and other studied traits. While a negative correlation (r = –0.28**) was observed between the L value and the a* value studied, a positive correlation was found between b* (r = +0.33**), chroma value (r = +0.22**), and hue angle (r = +0.39**). A statistically insignificant correlation was noticed between the L value and nutrient content in grain, and negative correlations were found among all characters, except the starch level.

The a* value (red/green): The a* values of the maize lines forming the population varied between 5.32 and 15.93, and the mean was determined as 10.52 ± 0.20. The values of the genotypes in the population showed a large variation in their characteristics (see Table 2). It was observed that the values of all genotypes in the population were positive, that is, in the red tone region. While the a* value of the UGSH-402 genotype was greater than 15, it was determined that the values of 99.12% (111 pcs.) of the population were less than 15. According to the correlation analysis performed on the genotypes of the population, the a* value was positively correlated with a number of characters, including 1000-kernel weight (r = +0.31), hectoliter weight (r = +0.24**), seed weight per ear (r = +0.23*), crude protein content (r = +0.17; *P* = 0.07), and crude ash content (r = +0.18; *P* = 0.06), Additionally, statistically significant connections were found between the a* value and the other features that were investigated, such as the hue angle (r = –0.94**), chroma (r = +0.46**), b* value (r = +0.20*), and L* value (r = –0.28). The association between the a* value and the majority of grain nutritional content features was extremely weak and statistically insignificant, except for crude protein content (r = +0.17; *P* = 0.07) and crude ash content (r = +0.18; *P* = 0.06), which were marginally significant.

The b* value (blue/yellow): The b* values of the maize lines forming the population varied between 18.07 and 44.40, and the mean was 32.71 ± 0.21. The b* values of the genotypes in the population showed a high variation in their characteristics (see Table 2). It was determined that the b* values of all genotypes in the population were positive, that is, in the yellow tone region. While the b* value of the UGSH-484, UGSH-357 and UGSH-22 genotypes was greater than or equal to 40, it was observed that the b* values of 97.35% (109 pcs.) of the population were less than 40. As a result of the correlation analysis performed with the genotypes forming the population, positive correlations were identified between the b* value and 1000-kernel weight (r = +0.20*), hectoliter weight (r = +0.18; *P* = 0.06), and seed weight per ear (r = +0.19*). The b* value and the other qualities that were analyzed showed statistically significant relationships (L* value, r = +0.33**; a* value, r = +0.20*; chroma value, r = +0.96**). Statistically insignificant correlations were found between the b* value and grain nutrient content.

The chroma value: The chroma values of the maize lines forming the population varied within 18.98–46.12, and the mean was calculated as 34.41 ± 0.22. The chroma value of the genotypes in the population showed a great variation in their characteristics (see Table 2). The chroma values of all genotypes in the population were found to be positive. While the chroma value of the UGSH-485, AHM-87, AHM-477, UGSH-22, UGSH-276 and UGSH-357 genotypes were greater than or equal to 40, it was determined that the values of 94.69% (106 pcs.) of the population were less than 40. Positive correlations between the chroma value and 1000-kernel weight (r = +0.27**), hectoliter weight (r = +0.23*), and seed weight per ear (r= +0.23*) were found as a consequence of the correlation study carried out with the genotypes comprised in the population. Statistically significant correlations were detected between the chroma value and other examined characters (L* value, r = +0.22*; a* value, r = +0.46**; b* value, r = +0.96**), hue angle (r = –0.13; *P* = 0.18). Statistically insignificant correlations were identified between the chroma value and the content of nutrients in grain.

Table 2. Changing values of color indicators in the studied accessions

Таблица 2. Изменение значений цветовых показателей изученных образцов

Parameters / Параметры	Chroma / Цвет				
	L value (luminance) / Значение L (яркость)	a* value (red/green) / Значение a* (красный/зеленый)	b* value (blue/yellow) / Значение b* (синий/желтый)	Chroma value in the a*b* plane / Значение цвета в плоскости a*b*	Hue angle in the a*b* plane / Угол оттенка в плоскости a*b*
Min.	42.36	5.32	18.07	18.98	62.50
Max.	66.49	15.93	44.40	46.12	80.14
Means	57.48 ± 0.28	10.52 ± 0.20	32.71 ± 0.21	34.41 ± 0.22	72.18 ± 0.32

Hue angle: The color quality values of the maize lines forming the population varied between 62.50 and 80.14, and the mean was estimated as 72.18 ± 0.32. The genotypes in the population did not show a great variation in the hue values (see Table 2). It was determined that the hue values of all genotypes in the population were positive. While the hue values of the UGSH-23 and UGSH-24 genotypes were greater than or equal to 80, the values of 98.23% (110 pcs.) of the population were found to be less than 80. As a result of the correlation analysis performed with the genotypes forming the population, negative correlations were detected between the hue value and 1000-kernel weight (r = –0.24*), hectoliter weight (r = –0.18*), and seed weight per ear (r = –0.16; *P* = 0.09). Statistically significant correlations were found between the hue value and other features examined (L* value, r = +0.39**; a* value, r = –0.94**). Negative correlations were observed between the hue value and crude protein ratio (r = –0.17; *P* = 0.07), cellulose ratio (r = –0.16; *P* = 0.08), and crude ash rate (r = –0.19*).

Consideration of the characters revealed that there was no significant differences in the hue angle and L* value indicators, but there were significant variations in the a* value, b* value, and chroma value characters.

Clustering analysis: Five clusters were arranged in the obtained model. The numbers of genotypes and mean values for these clusters are given in Table 3.

With the classification obtained, the studied genotypes were assembled in 5 different main clusters/classes. In addition, as a result of Mantel's matrix correspondence test (Mantel, 1967) conducted to specify the extent to which the dendrogram represents the correspondence matrix, the rate of 0.85 (very good) was found. The 1st cluster contains 98 genotypes (AHM-60, AHM-61, AHM-76, AHM-95 W, AHM-95 Y, AHM-160, AHM-181, AHM-191, AHM-204, AHM-213, AHM-214, AHM-230, AHM-238, AHM-243, AHM-269, AHM-294, AHM-340, AHM-439, AHM-455, AHM-457, AHM-458, AHM-475, AHM-478, UGSH-481, AHM-483, AHM-484, AHM-485, EHM-209, EHM-234, EHM-265, EHM-296, EHM-297, EHM-298, EHM-342, EHM-343, EHM-370, EHM-407, EHM-439, EHM-473, EHM-488, UGSH-15, UGSH-19, UGSH-24, UGSH-26, UGSH-28, UGSH-29, UGSH-31, UGSH-50, UGSH-51, UGSH-57, UGSH-65, UGSH-74, UGSH-78, UGSH-79, UGSH-100, UGSH-102, UGSH-104, UGSH-106, UGSH-123, UGSH-125, UGSH-128, UGSH-130, UGSH-131, UGSH-134, UGSH-143, UGSH-154, UGSH-159, UGSH-160, UGSH-165, UGSH-169, UGSH-176, UGSH-213, UGSH-241, UGSH-254, UGSH-266, UGSH-268, UGSH-272, UGSH-274, UGSH-276, UGSH-292, UGSH-341, UGSH-348, UGSH-349, UGSH-351, UGSH-371, UGSH-391, UGSH-393, UGSH-407, UGSH-424, UGSH-431, UGSH-454, UGSH-459, UGSH-470, UGSH-474, UGSH-476, UGSH-480, UGSH-484, and UGSH-490). The 2nd cluster contained 5 of them (AHM-87, AHM-477, UGSH-22, UGSH-357, and UGSH-485); the 3rd contained 6 (EHM-245, EHM-325, UGSH-402, UGSH-68, UGSH-173, and UGSH-167); the 4th contained one (UGSH-168); the 5th contained two (UGSH-175, and UGSH-291) (see Table 3) (Fig. 3, 4). The percentage of the genotypes in cluster 1 was 87%. Clusters 2–5 were considerably weaker than cluster 1. There is not enough evidence to speak about a large variation in this case.

Table 3. **Numbers of maize genotypes and mean values for their clusters**

Таблица 3. **Количество генотипов кукурузы и средние значения для их кластеров**

Cluster No. / № кластера	Number of accessions / Количество образцов	L* value (luminance) / Значение L* (яркость)	a* value (red/green) / Значение a* (красный/ зеленый)	b* value (blue/yellow) / Значение b* (синий/ желтый)	Chroma value in the a*b* plane / Значение цвета в плоскости a*b*	Hue angle in the a*b* plane / Угол оттенка в плоскости a*b*
1	98	58.16	10.45	32.82	34.48	72.41
2	5	60.87	11.24	41.12	42.64	74.75
3	6	50.67	13.03	28.02	30.92	65.18
4	1	42.36	8.71	32.77	33.91	75.12
5	2	43.63	5.72	20.21	21.01	74.03
R^2		0.49	0.17	0.59	0.53	0.29

R^2 values were calculated in the cluster analysis as 0.49 for the L* value, 0.17 for the a* value, 0.59 for the b* value, 0.53 for the chroma value, and 0.29 for the hue angle. The mean values in the 1st cluster were 58.16 for the L* value, 10.45 for the a* value, 32.82 for the b* value, 34.48 for the chroma value, and 72.41 for the hue angle. The means in the 2nd cluster were 60.87 for the L* value, 11.24 for the a* value, 41.12 for the b* value, 42.64 for the chroma value, and 74.75 for the hue angle. The means in the 3rd cluster were 50.67 for the L* value, 13.03 for the a* value, 28.02 for the b* value, 30.92 for the chroma value, and 65.18 for the hue angle. The means in the 4th cluster were 42.36 for the L* value, 8.71 for the a* value, 32.77 for the b* value, 33.91 for the chroma value, and 75.12 for the hue angle. The means in the 5th cluster were 43.63 for the L* value, 5.72 for the a* value, 20.21 for the b* value, 21.01 for the chroma value, and 74.03 for the hue angle.

The results of the principal component analysis (PCA) conducted within the scope of the research are presented in Table 4. As a result of the PCA, two PC groups with eigenvalues above 1 were obtained (PC1 with 50.78%, and PC2 with 39.50%), and these 2 PCs accounted for 90.28% of the population variance (see Table 4; Fig. 3). The resulting distribution is shown in Fig. 3 and Fig. 4. Our findings are similar to those published by B. Gouesnard et al. (1997), K. Wei et al. (2009), J. Kumari et al. (2017), C. Nelimor et al. (2019), J. Goyanka et al. (2021), and J. Kumari et al. (2024).

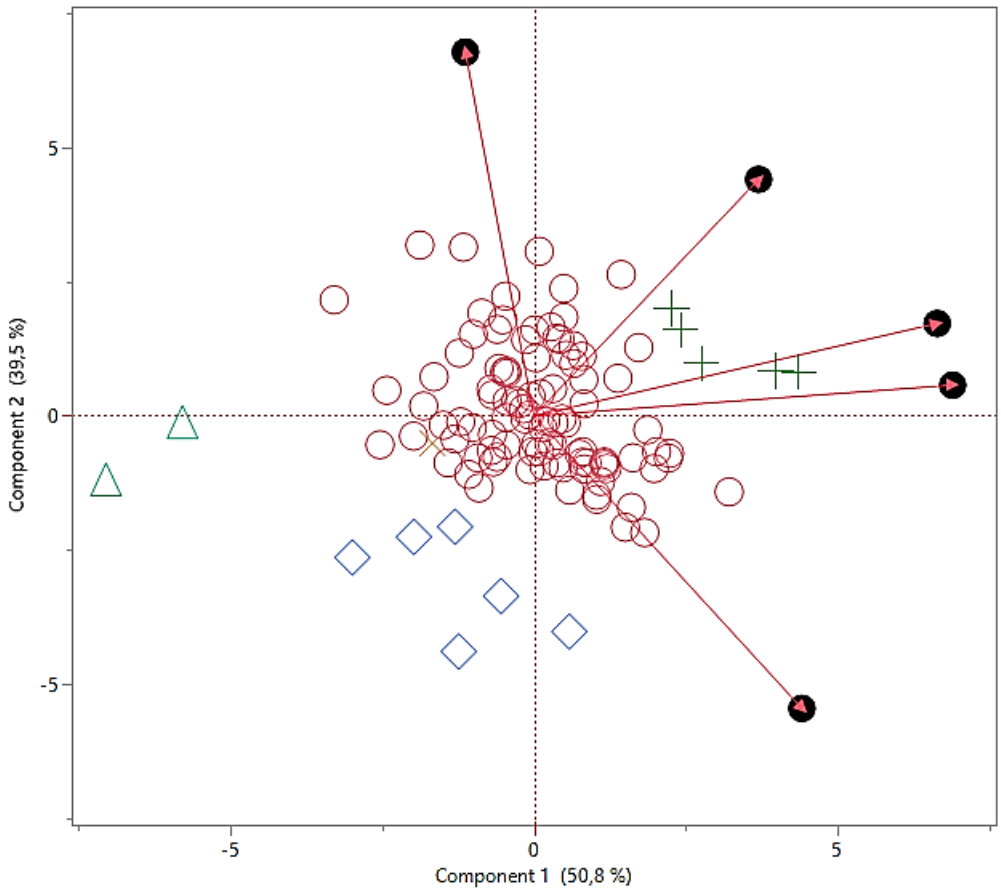


Fig. 3. Distribution obtained with PC1 and PC2

Рис. 3. Распределение, полученное с помощью PC1 и PC2

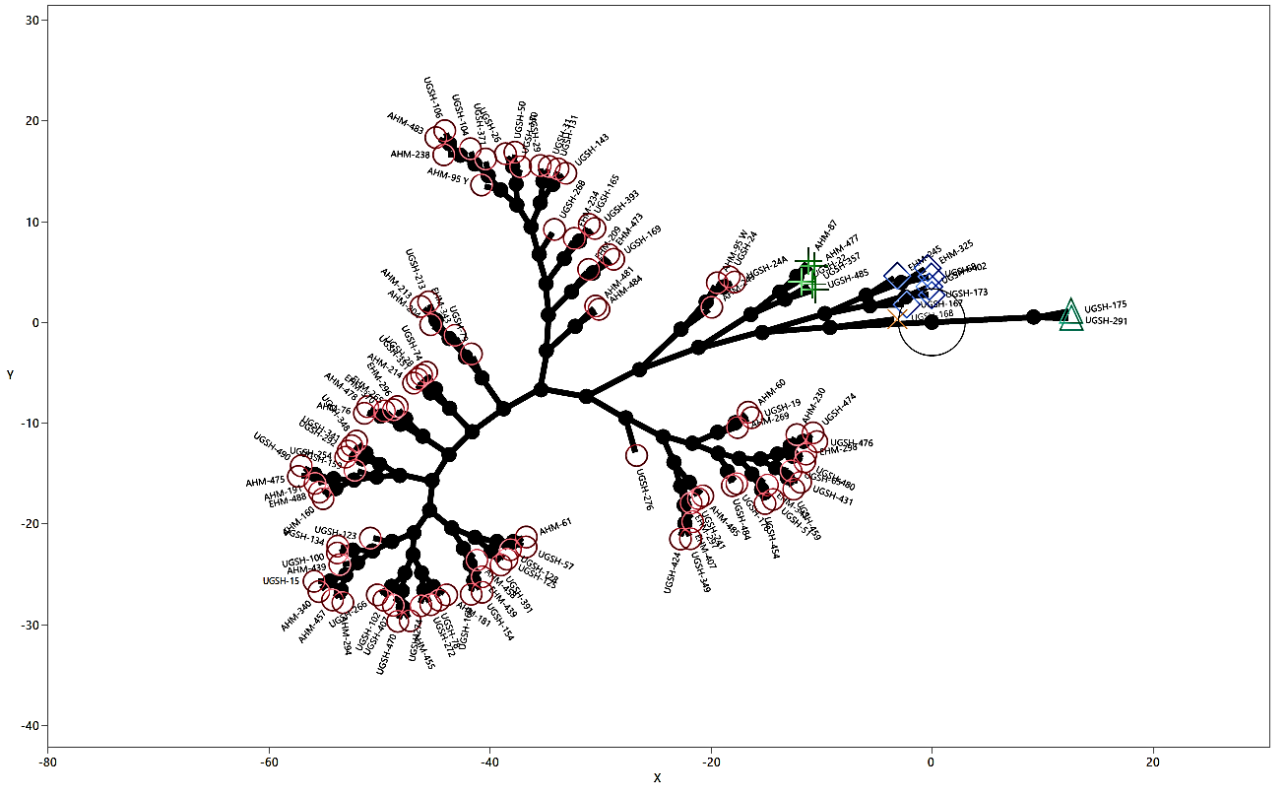


Fig. 4. Cluster analysis showing the distribution of the collection into groups (clusters 1, 2, 3, 4 and 5)

Рис. 4. Кластерный анализ, отображающий распределение коллекции по группам (кластеры 1, 2, 3, 4 и 5)

Table 4. Principal component analysis results

Таблица 4. Результаты анализа главных компонент

Cluster No. / № кластера	Eigenvalue / Собственное значение	Percentage / Процент	Accumulation percentage / Процент накопления
1	2.538992	50.78	50.78
2	1.975012	39.50	90.28
3	0.481662	9.63	99.91
4	0.004048	0.081	99.99
5	0.000286	0.006	100.00

It is seen in the dendrograms based on grain color parameters data that the genotypes are gathered in 5 groups. Grain color parameters of the genotypes in Azerbaijani germplasm were assessed and genetic variation in these parameters was revealed. Consideration of the characters showed that there was no significant variance in the hue angle and L* value, but the variation was statistically significant for the a* value, b* value, and chroma value.

The information on allelic diversity obtained as a result of this study will help to determine the parents in future maize breeding investigations. Depending on the results, combining individuals with the same alleles with individuals carrying rare alleles (due to the narrowing of the gene pool), instead of each other, will increase genetic diversity. Again, by determining genetic distances, hybridization among completely distant individuals will increase variation in hybrid plants.

In this research, the grain color characteristics of homozygous maize accessions grown within the boundaries of Azerbaijani germplasm were compared. It is recommended that plant breeding investigations should be continued for some maize genotypes identified as promising in terms of their grain color parameters and that more detailed studies need to be conducted using other molecular marker techniques in future research efforts.

The classification methods (cluster analysis) used together with the regularization technique (PCA) applied to multivariate data confirmed five well-defined groups of accessions. Cluster 1 contained 87% of the genotypes. Clusters 2 to 5 were considerably weaker than cluster 1. There is not enough evidence to speak about the presence of a large variation. For this reason, no major variation in color properties was found in the examined grains.

Assessing genetic diversity also provides germplasm curators with the opportunity to identify gaps in the collection, identify traits where useful variability is limited in the source collection, and also maximize the diversity in the collection, thereby demonstrating the need for trait-specific research.

Conclusion

The dendrograms based on grain color parameters data demonstrate that the genotypes are assembled in 5 groups. Grain color parameters of the genotypes in Azerbaijani germplasm were assessed and genetic variation was revealed in these parameters. Descriptive statistics of the findings obtained from the population showed that there was a large variation in the variables representing the examined characteristics in the population.

The information on allelic diversity obtained as a result of this study will help to determine the parents in future maize breeding investigations. Depending on the results, combining individuals with the same alleles with individuals carrying rare alleles (due to the narrowing of the gene pool), instead of each other, will increase genetic diversity. Again, by measuring genetic distances, hybridization of completely distant individuals will increase variation in hybrid plants (Aka-Kaçar et al., 2003).

In this research, homozygous maize genotypes located within the gene center borders of Azerbaijan were compared for some of their grain color parameters. It is recommended that breeding-oriented research should be continued for some maize genotypes identified as promising for their grain color parameters and that more detailed investigations using other molecular marker techniques need to be conducted in future research endeavors.

The classification methods (cluster analysis) used together with the regularization technique (PCA) applied to multivariate data confirmed five well-defined groups of accessions. In some cases, accessions originating from the same location fall into tight groups within clusters (1, 2, 3, 4 and 5). Assessing genetic diversity also provides germplasm curators with the opportunity to identify gaps in the collection, identify traits where useful variability is limited in the source collection, and also maximize the diversity in the collection, thereby demonstrating the need for trait-specific research.

References / Литература

Aka-Kaçar Y., Kuden A.B., Çetiner S. Identification of varietal polymorphism in *Ficus carica* L. by RAPD (randomly amplified polymorphic DNA) markers. *Acta Horticulturae*. 2003;598:167-172. DOI: 10.17660/ActaHortic.2003.598.24

Beetsma J. The CIELAB system – the method to specify colors of coatings. ULTRUS Prospector Knowledge Center; 2024. Available from: https://www.ulprospector.com/knowledge/16423/pc-the-cielab-system-the-method-to-specify-colors-of-coatings/ [accessed Dec. 10, 2024].

Dumanovic J. Visokouljani kukuruz, potencijalni izvor ulja visoskog kvaliteta. Beograd-Zemun: Institut za kukuruz; 1995. [in Serbian]

Gouesnard B., Dallard J., Panouillé A., Boyat A. Classification of French maize populations based on morphological traits. *Agronomie*. 1997;17(9-10):491-498. DOI: 10.1051/agro:19970906

Goyanka J., Yadav M.C., Kumari J., Tiwari S., Kumar A. Phenotypic characterization reveals high extent of genetic variation in maize (*Zea mays* L.) landraces of North-Eastern and North-Western Himalayan Regions of India. *Indian Journal of Plant Genetic Resources*. 2021;34(3):389-403. DOI: 10.5958/0976-1926.2021.00032.2

JMP Statistical Discovery: [website]. Available from: https://www.jmp.com/en/home [accessed Dec. 09, 2024].

Kahriman F., Akgül M., Ölmez I., Egesel C.Ö. Variability in some quality and agronomic characters in a high oil maize population under selection. *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University*. 2017;34(3):228-236. [in Turkish] DOI: 10.13002/jafag4219

Kettler W., Wilker G., Binder M., Franz W., Gabel P., Gauss S., Hempelmann U., Hennin R. Colour technology of coatings. Hannover: Vincentz GmbH; 2016.

Kırca L. Hue açısı nedir? Excel'de Hue açısı nasıl hesaplanır? *Levent Kırca* (blog); 2020. [in Turkish] Available from: https://leventkirca.com.tr/hue-acisi-nedir-excelde-hue-acisi-nasil-hesaplanir [accessed Dec. 10, 2024].

Kumari J., Kumar A., Singh T.P., Bhatt K.C., Mishra A.K., Semwal D.P. et al. Collection, evaluation and phenotypic diversity assessment of maize (*Zea mays*) germplasm from North Eastern Himalayan region. *The Indian Journal of Agricultural Sciences*. 2017;87(6):727-733. DOI: 10.56093/ijas.v87i6.70929

Kumari J., Sharma S.S., Jacob S.R., Sharma R.K., Jakhar P., Langyan S. et al. Phenotypic diversity of maize landraces from North-Western India and exploring their potentiality. *Indian Journal of Plant Genetic Resources*. 2024;37(2):1-13. DOI: 10.61949/0976-1926.2024.v37i02.00

Lao F., Sigurdson G.T., Giusti M.M. (2017). Health benefits of purple corn (*Zea mays* L.) phenolic compounds. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2017;16(2):234-246. DOI: 10.1111/1541-4337.12249

Mantel N. The detection of disease clustering and a generalized regression approach. *Cancer Research*. 1967;27(2):209-220.

Meteoblue: A Windy.com company. Simulated historical climate and weather data for Zaqatala: [website]. Available from: https://www.meteoblue.com/en/weather/historyclimate/climatemodelled/zaqatala_azerbaijan_584596 [accessed Dec. 29, 2024].

Nelimor C., Badu-Apraku B., Nguetta S.P.A., Tetteh A.Y., Garcia Oliveira A.L. Phenotypic characterization of maize landraces from Sahel and Coastal West Africa reveals marked diversity and potential for genetic improvement. *Journal of Crop Improvement*. 2019;34:122-138. DOI: 10.1080/15427528.2019.1674760

Öktem A., Toprak A. Determination of yield and morphological characteristics of some dent corn (*Zea mays* L. *indentata*) genotypes in Çukurova conditions. *Harran University Faculty of Agriculture Journal*. 2013;17(4):15-24. [in Turkish]

Öz A., Kapar H., Dok M. Corn agriculture. Samsun: Black Sea Agricultural Research Institute; 2017.

Özdemir E., Sade B., Correlation of some of agro-morphological and physiological traits in maize inbred lines developed in Konya conditions. *Anadolu Journal of Agricultural Sciences*. 2019;34(1):73-77. DOI: 10.7161/omuanajas.466502

TEPGE yayin No: 390. Aralık: TEPGE; 2023. [in Turkish]

UPOV. Guidelines for the conduct of tests for distinctness, uniformity and stability. Maize (*Zea mays* L.). Geneva: UPOV; 2009. Available from: https://www.upov.int/test_guidelines/en/fulltext_tgdocs.jsp?lang_code=EN&q=maize [accessed on Jun. 07, 2025].

Vartanli S., Emeklier H.Y. Determination of the yield and quality characteristics of hybrid maize varieties under Ankara conditions. *Journal of Agricultural Sciences*. 2007;13(3):195-202.

Wang H.W., Hu H.X., Song T.M., Chen S.J. Seed traits evaluation from long-term selection of kernel oil concentration in a high-oil maize population KYHO. *Canadian Journal of Plant Science*. 2012;92(5):857-866. DOI: 10.4141/cjps2011-247

Wei K., Zhang H., Xu X., Du H., Huang Y., Zhang Z. Evaluation of phenotype and genetic diversity of maize landraces from Hubei Province, Southwest China. *Frontiers of Agriculture in China*. 2009;3(4):374-382. DOI: 10.1007/s11703-009-0075-1

Information about the authors

Halima R. Mammadova, Director of a Laboratory, Research Institute of Crop Husbandry, Sovkhoz No. 2, Pirshagi Settlem., Baku AZ1098, Azerbaijan, helime0101@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-7456-0527

Eduard B. Khatefov, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, haed1967@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0001-5713-2328

Remzi Ekinci, PhD, Associate Professor, Dicle University, Diyarbakir 21280, Turkey, remzi.ekinci@dicle.edu.tr, https://orcid.org/0000-0003-4165-6631

Информация об авторах

Халима Рафиз-кызы Мамедова, директор лаборатории, Научно-исследовательский институт земледелия, AZ1098 Азербайджан, Баку, пос. Пиршаги, совхоз № 2, helime0101@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-7456-0527

Эдуард Балилович Хатефов, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, haed1967@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0001-5713-2328

Ремзи Экинджи, доктор философии, доцент, Университет Диджле, 21280 Турция, Диярбакыр, remzi.ekinci@dicle.edu.tr, https://orcid.org/0000-0003-4165-6631

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.
Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The article was submitted on 24.03.2025; approved after reviewing on 02.06.2025; accepted for publication on 21.07.2025.
Статья поступила в редакцию 24.03.2025; одобрена после рецензирования 02.06.2025; принята к публикации 21.07.2025.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 575.222.73:58.032.3
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-102-111

CC BY

Негативное влияние интрогрессии в хромосому 5AL мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) от тетраплоидной пшеницы *(Triticum timopheevii* (Zhuk.) Zhuk. subsp. *timopheevii*) на устойчивость к засухе и продуктивность

С. В. Осипова[1, 2], А. В. Пермяков[1], А. В. Рудиковский[1], М. Д. Пермякова[1], Е. Г. Рудиковская[1], А. В. Поморцев[1], Т. А. Пшеничникова[3]

[1] *Сибирский институт физиологии и биохимии растений Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия*

[2] *Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия*

[3] *Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия*

Автор, ответственный за переписку: Светлана Владимировна Осипова, svetlanaosipova2@mail.ru

Актуальность. Интрогрессивную гибридизацию используют для увеличения генетического разнообразия и повышения устойчивости к болезням мягкой пшеницы *Triticum aestivum* L. Интрогрессии от тетраплоидной пшеницы *Triticum timopheevii* (Zhuk.) Zhuk. subsp. *timopheevii* в мягкую пшеницу ‘Саратовская 29’ (S29) помогли повысить ее устойчивость к грибным заболеваниям. Необходимы исследования влияния интрогрессивной гибридизации на устойчивость пшеницы к абиотическим стрессорам.
Материалы и методы. В контролируемых условиях при двух режимах водоснабжения исследовали параметры газообмена и флуоресценции хлорофилла, содержание хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов, свободного пролина, активность ферментов аскорбат-глутатионового цикла, каталазы и липоксигеназы в листьях и биомассу побега у сорта пшеницы S29 и линии S29 (821 5A), несущей сегмент интрогрессии от *T. timopheevii* subsp. *timopheevii* в дистальном участке хромосомы 5AL. Компоненты продуктивности изучали в гидропонной теплице в двух режимах водоснабжения.
Результаты. По сравнению с сортом S29 линия S29 (821 5A) показала сниженное количество поглощаемой и переносимой энергии на один реакционный центр фотосистемы II при оптимальном поливе. Также у линии на 30% снизилась активность ферментов аскорбат-глутатионового цикла и значительно повысилось содержание пролина в листьях. У линии S29 (821 5A) отмечены ослабленные защитные реакции на стресс от засухи. Она уступала сорту S29 по продуктивности главного колоса, независимо от условий полива.
Заключение. Интрогрессия от *T. timopheevii* subsp. *timopheevii* в дистальную область хромосомы 5AL отрицательно повлияла на устойчивость к засухе и продуктивность мягкой пшеницы. Для комплексной оценки устойчивости межвидовых гибридов к неблагоприятным факторам необходимы физиолого-биохимические исследования.

Ключевые слова: фотосинтез, активность антиоксидантных ферментов и липоксигеназы, пролин, компоненты продуктивности, опушение листа

Благодарности: исследование выполнено в рамках реализации государственных заданий СИФИБР СО РАН № 0277-2025-0006 «Изучение механизмов формирования, поддержания и регуляции устойчивого состояния растений: генетические, физиолого-биохимические, эволюционные и экологические аспекты» и ФНЦ ИЦиГ СО РАН по проекту № FWNR-2022-0017 «Генетический контроль развития и формирования хозяйственно-ценных признаков у сельскохозяйственных растений». В работе использовано оборудование ЦКП «Биоаналитика» СИФИБР СО РАН и ЦКП репродукции растений ИЦиГ СО РАН.
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Осипова С.В., Пермяков А.В., Рудиковский А.В., Пермякова М.Д., Рудиковская Е.Г., Поморцев А.В., Пшеничникова Т.А. Негативное влияние интрогрессии в хромосому 5AL мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) от тетраплоидной пшеницы (*Triticum timopheevii* (Zhuk.) Zhuk. subsp. *timopheevii*) на устойчивость к засухе и продуктивность. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(3):102-111. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-102-111

© Осипова С.В., Пермяков А.В., Рудиковский А.В., Пермякова М.Д., Рудиковская Е.Г., Поморцев А.В., Пшеничникова Т.А., 2025

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-102-111

Negative effect of an introgression into chromosome 5AL of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) from tetraploid wheat (*Triticum timopheevii* (Zhuk.) Zhuk. subsp. *timopheevii*) on drought tolerance and productivity

Svetlana V. Osipova[1, 2], Aleksey V. Permyakov[1], Alexandr V. Rudikovskii[1], Marina D. Permyakova[1], Elena G. Rudikovskaya[1], Anatolii V. Pomortsev[1], Tatyana A. Pshenichnikova[3]

[1] *Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia*

[2] *Irkutsk State University, Irkutsk, Russia,*

[3] *Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

Corresponding author: Svetlana V. Osipova, svetlanaosipova2@mail.ru

Background. Introgressive hybridization is used to increase genetic diversity and improve disease resistance in bread wheat *Triticum aestivum* L. Introgressions from tetraploid wheat *Triticum timopheevii* (Zhuk.) Zhuk. subsp. *timopheevii* into bread wheat 'Saratovskaya 29' (S29) helped to increase its resistance to fungal diseases. There is a need for thorough studies into the effect of introgressive hybridization on tolerance to abiotic stressors in wheat.
Materials and methods. Gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters, chlorophyll *a* and *b* content, carotenoids, free proline, ascorbate-glutathione cycle enzyme activity, catalase and lipoxygenase in leaves, and shoot biomass were analyzed in wheat cultivar S29 and line S29 (821 5A) carrying a *T. timopheevii* subsp. *timopheevii* introgression segment in the distal region of chromosome 5AL, under controlled conditions with two water-supply regimes. Productivity components were assessed in a hydroponic greenhouse, also under two water-supply regimes.
Results. Compared with cv. S29, line S29 (821 5A) had a reduced amount of absorbed and transferred energy per reaction center of photosystem II under optimal watering. The line also had a 30% reduction in the activity of ascorbate-glutathione cycle enzymes and a significantly increased proline content in leaves. Line S29 (821 5A) showed weakened defense reactions to drought stress. It was inferior to cv. S29 in the main spike productivity, regardless of watering conditions.
Conclusion. Introgression from *T. timopheevii* subsp. *timopheevii* into the distal region of chromosome 5AL negatively affected the drought tolerance and productivity of bread wheat. Physiological and biochemical studies are required to make a comprehensive assessment of interspecific hybrids for their resistance to unfavorable factors.

Keywords: photosynthesis, antioxidant enzyme and lipoxygenase activity, proline, productivity components, leaf pubescence

Acknowledgements: the research was carried out within the framework of the state tasks assigned to the Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, No. 0277-2025-0006 "Study of the mechanisms forming, maintaining and regulating a stable state of plants: genetic, physiological and biochemical, evolutionary and environmental aspects", and the Institute of Cytology and Genetics, No. FWNR-2022-0017 "Genetic control of the development and formation of economically valuable traits in agricultural plants". The researchers employed the equipment of the Collective Use Center "Bioanalytics" of the Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry SB RAS, and the Collective Use Center for Plant Reproduction of the Institute of Cytology and Genetics, SB RAS.
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Osipova S.V., Permyakov A.V., Rudikovskii A.V., Permyakova M.D., Rudikovskaya E.G., Pomortsev A.V., Pshenichnikova T.A. Negative effect of an introgression into chromosome 5AL of common wheat (*Triticum aestivum* L.) from tetraploid wheat (*Triticum timopheevii* (Zhuk.) Zhuk. subsp. *timopheevii*) on drought tolerance and productivity. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(3):102-111. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-102-111

Введение

Гексаплоидная пшеница *Triticum aestivum* L. (2n = 42, BBA^UA^UDD) является жизненно важным источником питания для человека. Чтобы увеличить генетическое разнообразие и повысить устойчивость пшеницы, используют интрогрессивную гибридизацию. Тетраплоидная пшеница *T. timopheevii* (Zhuk.) Zhuk. subsp. *timopheevii* (2n = 28, A^tA^tGG) обладает большим потенциалом для увеличения генетического разнообразия мягкой пшеницы по различным хозяйственно ценным признакам. Этот подвид использовали в качестве донора генов иммунитета для улучшения устойчивости мягкой пшеницы к грибным заболеваниям (Leonova, Shumny, 2023), а также генов опушения листа и высокого содержания клейковины в зерне (Simonov et al., 2021; Shchukina et al., 2022). Линия 821 – одна из ста в коллекции интрогрессивных линий *T. aestivum / T. timopheevii* subsp. *timopheevii*, полученных в Институте цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЦиГ СО РАН, Новосибирск). Она создавалась скрещиванием *T. timopheevii* subsp. *timopheevii* с сортом мягкой пшеницы ‘Саратовская 29’ (S29) и имела участки интрогрессии в хромосомах 2A, 2B и 5A (Leonova et al., 2008). Позже была создана линия S29 (821 5A), несущая один фрагмент интрогрессии в дистальном участке хромосомы 5AL (Simonov et al., 2021). По сравнению с сортом у линии S29 (821 5A) более чем в два раза снижалось количество трихом на обеих сторонах листа и в среднем в полтора раза увеличивалась длина трихом независимо от условий полива, что связывали с геном Hl^{tt}, локализованным в дистальном участке длинного плеча хромосомы $5A^t$ пшеницы *T. timopheevii* subsp. *timopheevii* (Simonov et al., 2021). Существуют представления о перекрестных регуляторных взаимодействиях белков сети формирования трихом и факторов, контролирующих реакцию на стрессы, рост и развитие (Kabir et al., 2024). Кроме того, показана взаимосвязь между опушением листа и фотосинтезом (Pshenichnikova et al., 2018). Интрогрессия в дистальный участок хромосомы 5AL могла повлиять не только на характеристики опушения листа, но также на фотосинтез и устойчивость к абиотическим стрессовым факторам. Для проверки этого предположения провели сравнительное физиолого-биохимическое исследование устойчивости сорта и линии S29 (821 5A) к водному дефициту.

Устьичные реакции в значительной степени определяют водный баланс растений, поэтому устьичную проводимость, скорость транспирации и скорость нетто-фотосинтеза используют для оценки устойчивости к дефициту воды (Pflüger et al., 2024). Подробнее состояние фотосинтетического аппарата можно описать с помощью метода флуоресценции хлорофилла (Chl), который является чувствительным, надежным и неинвазивным способом оценки эффективности процессов световой фазы фотосинтеза и используется для мониторинга физиологического состояния растений при решении разнообразных задач (Goltsev et al., 2016; Osipova et al., 2024). Помимо непосредственной оценки функций фотосинтетического аппарата, важно определить уровень его антиоксидантной защиты при водном дефиците. Ферменты аскорбат-глутатионового цикла, супероксиддисмутаза (SOD, КФ 1.15.1.1), дегидроаскорбатредуктаза (DHAR, КФ 1.8.5.1), глутатионредуктаза (GR, КФ 1.6.4.2) и аскорбатпероксидаза (APX, КФ 1.11.1.11), а также каталаза (CAT, КФ 1.11.1.6) защищают растительные клетки в стрессовых условиях и поддерживают клеточный гомеостаз, эффективно минимизируя избыточное производство активных форм кислорода (Mir, Khah, 2023). Активности этих ферментов успешно используют для скрининга засухоустойчивости зерновых (Panda et al., 2021). Липоксигеназы (LOX, КФ 1.13.11.12) влияют на рост и развитие растений, а также на устойчивость к биотическим и абиотическим стрессорам (Viswanath et al., 2020).

Накопление осмолитов, в частности свободного пролина, при обезвоживании и других неблагоприятных факторах среды также считается одним из наиболее важных защитных механизмов, поскольку пролин способствует стабилизации субклеточных структур, улавливанию свободных радикалов и поддержанию окислительно-восстановительного потенциала клеток в стрессовых условиях (Chakraborty, Kumari, 2023). Таким образом, вышеперечисленные параметры можно рассматривать в качестве критериев оценки устойчивости линии S29 (821 5A) и сорта S29.

Цель исследования – определить влияние интрогрессии от *T. timopheevii* subsp. *timopheevii* в дистальный участок хромосомы 5AL сорта мягкой пшеницы ‘Саратовская 29’ (S29) на ее устойчивость к дефициту воды.

Материалы и методы

Объектом исследования служила замещенная линия S29 (821 5A), создание которой описано А. В. Симоновым и соавторами (Simonov et al., 2021). В качестве контроля использовался родительский сорт мягкой пшеницы ‘Саратовская 29’ (S29). Для проведения физиолого-биохимических экспериментов растения выращивали в контролируемых условиях климатической камеры CLF Plant Master (CLF Plant Climatic GMBH, Германия), установленной на фитотроне Сибирского института физиологии и биохимии растений Сибирского отделения Российской академии наук (г. Иркутск). В камере поддерживался 16-часовой фотопериод с интенсивностью света 500 мкмоль (фотон)/$м^{-2}$ $с^{-1}$, дневной/ночной температурой 23/16°C и относительной влажностью воздуха 60%. По 12 зерен высевали в сосуды Митчерлиха, содержащие 4 кг субстрата, состоящего из перегноя, песка и торфа в соотношении 1 : 1 : 1. Для каждого генотипа один сосуд поддерживали в условиях оптимального полива (60% от полной влагоемкости почвы), второй – в условиях водного дефицита (30%). Влажность почвы в сосудах контролировали весовым методом. На стадии «цветение» измеряли параметры газообмена и флуоресценции Chl на средней части развернутых флаговых листьев. Скорость транспирации (E), устьичную проводимость (Gs) и скорость ассимиляции CO_2 (A) изучали с помощью портативной системы для измерения газообмена и флуоресценции Chl GFS-3000 (Heinz Walz GmbH, Германия).

Флуоресценцию Chl оценивали с помощью флуориметра PAM 2500 (Heinz Walz GmbH, Германия). Измеряли медленную кинетику индукции флуоресценции Chl, быстрые световые кривые и быструю кинетику индукции флуоресценции Chl (кривая OJIP). Всего было измерено и рассчитано 32 показателя флуоресценции Chl по методикам, описанным ранее (Osipova et al., 2024). После измерения газообмена и флуоресценции Chl главный побег срезали, измеряли его массу, отбирали и немедленно замораживали жидким азотом образцы флаговых листьев для дальнейших биохимических анализов. Образцы хранили при температуре –70°C. Методики определения содержания фотосинтетических пигментов и фермента-

тивных активностей описаны ранее (Osipova et al., 2024). Содержание свободного пролина измеряли спектрофотометрически (Hitachi U-1100, Япония) при длине волны 520 нм с использованием реагента нингидрина (Bates et al., 1973).

Компоненты продуктивности изучали в гидропонной теплице в ИЦиГ СО РАН. Растения выращивались в ваннах размером 4 × 1 × 0,35 м, заполненных керамзитом. Для питания растений использовался раствор Кнопа. Подробнее условия эксперимента с использованием различных условий водоснабжения описаны ранее (Smirnova, Pshenichnikova, 2021). Измеряли следующие компоненты продуктивности: число побегов, длину стебля и колоса, число и массу зерен в главном колосе и у растения в целом. Масса 1000 зерен являлась расчетной величиной. Главным считали колос, вносивший наибольший вклад в продуктивность растения.

За биологическую повторность принимали отдельное растение. Массу побега измеряли в восьми, параметры газообмена и флуоресценции Chl – в шести биологических повторностях. В статье обсуждаются только те параметры флуоресценции Chl, для которых наблюдали значимую разницу у генотипов или изменения под влиянием дефицита воды. Содержание пигментов и активность ферментов определяли в трех биологических и трех аналитических повторностях. Содержание пролина определяли трижды из объединенных пяти флаговых листьев каждого генотипа. В условиях гидропонной теплицы генотипы выращивали в течение трех вегетационных сезонов.

Влияние засухи оценивали используя показатель «размер эффекта засухи» (SDE). Он основан на различиях между средними значениями признаков в условиях засухи и контроля, учитывает размер выборки и объединенное стандартное отклонение (Peršić et al., 2022). Чем больше размер эффекта, тем больше увеличение параметра в условиях засухи по сравнению с контролем. Отрицательные значения указывают на уменьшение параметра по сравнению с контролем. Нулевые значения SDE означают отсутствие эффекта.

Расчет средних значений признаков, стандартных отклонений, значимости различий по t-критерию Стьюдента, значения SDE и построение графиков выполняли в Microsoft Excel 2010. Оценку достоверности различий между образцами по компонентам урожая проводили методом двухфакторного дисперсионного анализа и наименьшей существенной разности ($НСР_{05}$). Двухфакторный дисперсионный анализ проводили в Microsoft Excel Office Professional Plus 2016. Достоверность различий между дисперсиями устанавливали по F-критерию Фишера.

Результаты и обсуждение

В таблице 1 приведены средние значения физиологических параметров и стандартные отклонения для сорта S29 и линии S29 (821 5A) при оптимальном поливе (контроль) и при водном дефиците (засуха). Масса побега, параметры газообмена, содержание пигментов и активность DHAR в контроле не отличались у линии и сорта S29. У линии по сравнению с сортом S29 снизились показатели флуоресценции Chl, свидетельствующие о количестве поглощаемой (ABS/RC), улавливаемой (TR_0/RC), переносимой (ET_0/RC) и рассеиваемой энергии (DI_0/RC) на один реакционный центр фотосистемы II (PSII). При этом несколько возрастал показатель эффективности RC/ABS, то есть происходило увеличение доли активных реакционных центров PSII в общем пуле хлорофиллов (Goltsev et al., 2016). Подобная адаптация способствовала повышению эффективности фотосинтеза у линий и, предположительно, поддержанию скорости нетто-фотосинтеза. Коэффициенты фотохимического (qP) и нефотохимического тушения (NPQ) флуоресценции Chl в контроле значимо не изменялись. У линии по сравнению с сортом были снижены уровни активности GR и SOD в 1,3 раза, APX и LOX – в 1,8 раза, CAT – в 2,3 раза и почти на 70% повышено содержание свободного пролина (см. табл. 1). Значительное снижение антиоксидантной активности в контроле, по-видимому, приводило к увеличению окислительной нагрузки и увеличению содержания пролина в листьях, которое, как правило, повышается в ответ на действие разнообразных стрессоров (Chakraborty, Kumari, 2023). Эти данные указывают на то, что линия S29 (821 5A) с интрогрессией в дистальном участке хромосомы 5AL испытывала стресс в оптимальных условиях полива.

Те же генотипы вырастили в гидропонной теплице ИЦиГ СО РАН в двух режимах водоснабжения до стадии полной спелости зерна. Для оценки влияния генотипа (интрогрессии) и среды (дефицит воды) на продуктивность проводили двухфакторный дисперсионный анализ средних значений компонентов продуктивности при контрастных условиях орошения у линии S29 (821 5A) и сорта S29 (табл. 2). В контроле у линии S29 (821 5A) статистически значимо снижались длина стебля, длина колоса, число колосков в колосе, число и масса зерен в главном колосе и особенно масса 1000 зерен как с главного колоса, так и с целого растения. Таким образом, интрогрессия от *T. timopheevii* subsp. *timopheevii* в хромосому 5AL негативно повлияла на ростовые характеристики и зерновую продуктивность в оптимальных условиях полива.

В условиях засухи различия между линией S29 (821 5A) и сортом S29 по физиолого-биохимическим критериям были более существенными (см. табл. 1). По сравнению с S29 у линии снизились скорость транспирации и устьичная проводимость, повысилось содержание хлорофиллов и каротиноидов, уменьшились коэффициенты фото- и нефотохимического тушения флуоресценции (qP и NPQ), а также максимальная скорость транспорта электронов (ETR_{max}). Также у линии по сравнению с сортом S29 значительно понизились уровни активности ферментов аскорбат-глутатионового цикла: DHAR в 3,6 раз, GR – в 4,7 раза, SOD – в 1,4 раза и APX – в 1,8 раза. Активности CAT и LOX поддерживались на уровне сорта S29.

На рисунке приведен статистический показатель «размер эффекта» (SDE), позволяющий оценить влияние засухи на изученные признаки у линии S29 (821 5A) и сорта S29. У обоих генотипов величина SDE для скорости транспирации и устьичной проводимости была отрицательной, но у линии эти значения примерно в два раза ниже. У сорта S29 скорость нетто-фотосинтеза при засухе значимо снижалась, тогда как у линии S29 (821 5A) изменения этого параметра были незначительными. У сорта S29, в отличие от линии, при засухе повышалась эффективность фотосинтетического аппарата, о чем можно судить по коэффициенту фотохимического тушения флуоресценции Chl (qP). Нефотохимическое тушение флуоресценции Chl (NPQ) у сорта S29 также повышалось (рисунок, а), что свидетельствует об активации механизмов рассеивания избыточной световой энергии и преобразования ее в тепло. Эти процессы активируются при дей-

Таблица 1. Фотосинтетические и биохимические параметры у сорта ‘Саратовская 29’ и линии S29 (821 5A) в контроле и при засухе

Table 1. Photosynthetic and biochemical parameters of cv. ‘Saratovskaya 29’ and line S29 (821 5A) in the control test and under drought

Признаки	Сорт ‘Саратовская 29’		Линия S29 (821 5A)	
	Контроль	Засуха	Контроль	Засуха
Масса побега	5,7 ± 1,0	3,2 ± 0,7	5,6 ± 0,5	3,3 ± 0,6
Параметры газообмена				
E, ммоль $м^{-2}$ $с^{-1}$	1,9 ± 0,2	1,2 ± 0,2	2,0 ± 0,2	0,5 ±0,1***
Gs, ммоль $м^{-2}$ $с^{-1}$	0,14 ± 0,0	0,08 ± 0,0	0,15 ± 0,0	0,03 ± 0,0***
A, мкмоль $м^{-2}$ $с^{-1}$	11,7 ± 0,7	9,7 ± 1,0	11,6 ± 0,8	9,2 ± 3,2
Параметры флуоресценции хлорофилла				
RC/ABS	0,3 ± 0,0	0,3 ± 0,0	0,4 ± 0,0*	0,3 ± 0,0
ABS/RC	3,1 ± 0,1	3,0 ± 0,2	2,9 ± 0,1*	3,0 ± 0,3
TR_0/RC	2,3 ± 0,1	2,2 ± 0,1	2,2 ± 0,1*	2,3 ± 0,2
ET_0/RC	1,8 ± 0,1	1,8 ± 0,1	1,7 ± 0,1*	1,8 ± 0,1
DI_0/RC	0,8 ± 0,1	0,8 ± 0,2	0,7 ± 0,1*	0,7 ± 0,1
NPQ	0,9 ± 0,1	1,1 ± 0,5	1,1 ± 0,2	0,9 ± 0,1**
qP	0,5 ± 0,1	0,7 ± 0,1	0,5 ± 0,1	0,5 ± 0,0**
ETR_{max}	51,8 ± 31,7	92,1 ± 8,8	65,2 ± 10,0	70,8 ± 30,6*
Содержание фотосинтетических пигментов и свободного пролина				
Chl *a*, мг/г	2,6 ± 0,1	2,4 ± 0,1	2,6 ± 0,1	2,9 ± 0,2*
Chl *b*, мг/г	1,1 ± 0,0	1,1 ± 0,0	1,1 ± 0,0	1,7 ± 0,1**
Car, мг/г	0,6 ± 0,0	0,6 ± 0,0	0,5 ± 0,0	0,7 ± 0,0*
Chl *a* + *b*/Car	6,6 ± 0,5	6,4 ± 0,2	7,1 ± 0,2	6,6 ± 0,2
Prolin, мкмоль/г	20,7 ±1,0	11,6 ± 0,3	34,9 ± 0,4***	10,5 ± 0,1**
Активность ферментов, Е/мг белка				
DHAR	7,8 ± 0,6	13,1 ± 3,1	7,4 ± 3,7	3,6 ± 1,6***
GR	18,7 ± 4,7	46,8 ± 20,4	14,4 ± 6,5*	9,9 ± 1,8***
SOD	46,4 ± 4,3	49,6 ± 2,3	36,1 ± 1,9***	36,2 ± 2,2***
APX	48,2 ± 17,4	65,9 ± 18,0	26,8 ± 5,1***	36,8 ± 9,2***
CAT	4,9 ± 1,3	3,7 ± 1,3	2,1 ± 0,7*	3,7 ± 0,8
LOX	2,5 ± 0,2	2,7 ± 0,2	1,4 ± 0,3*	2,8 ± 0,1

Примечание: *, **, *** – $p < 0,05$, 0,01 и 0,001, сравнение признаков между линией S29 (821 5A) и сортом ‘Саратовская 29’ в одинаковых условиях водоснабжения; E – скорость транспирации, Gs – устьичная проводимость, A – скорость ассимиляции CO_2; RC/ABS – доля активных реакционных центров (РЦ) фотосистемы II; ABS/RC – поток энергии, поглощаемой одним РЦ PSII, TR_0/RC – поток энергии возбуждения, поглощаемой одним РЦ в начальный момент освещения адаптированного к темноте объекта, ET_0/RC – поток электронов, переносимых через один активный РЦ PSII, DI_0/RC – общее количество энергии, рассеиваемой одним РЦ в виде тепла, флуоресценции или переноса в другую фотосистему, NPQ – коэффициент нефотохимического тушения флуоресценции, qP – коэффициент фотохимического тушения флуоресценции, ETR_{max} – максимальная скорость транспорта электронов; Chl, Car, Prolin – содержание хлорофилла, каротиноидов, пролина в листьях; DHAR, GR, SOD, APX, CAT, LOX – активность дегидроаскорбатредуктазы, глутатионредуктазы, супероксиддисмутазы, аскорбатпероксидазы, каталазы и липоксигеназы

Note: *, **, *** – $p < 0.05$, 0.01 and 0.001, comparison of the traits between line C29 (821 5A) and cv. ‘Saratovskaya 29’ under the same water-supply conditions; E – transpiration rate, Gs – stomatal conductance, A – CO_2 assimilation rate; RC/ABS – proportion of active reaction centers (RC) of photosystem II; ABS/RC is the energy flux absorbed by one PSII RC, TR_0/RC is the excitation energy flux absorbed by one RC at the initial moment of illumination of a dark-adapted object, ET_0/RC is the electron flux transferred through one active PSII RC, DI_0/RC is the total amount of energy dissipated by one RC as heat, fluorescence, or transfer to another photosystem, NPQ is the coefficient of non-photochemical fluorescence quenching, qP is the coefficient of photochemical fluorescence quenching, ETR_{max} is the maximum electron transport rate; Chl, Car, Prolin – content of chlorophyll, carotenoids and proline in leaves; DHAR, GR, SOD, APX, CAT, LOX are the activities of dehydroascorbate reductase, glutathione reductase, superoxide dismutase, ascorbate peroxidase, catalase, and lipoxygenase

Таблица 2. **Двухфакторный дисперсионный анализ средних значений компонентов продуктивности растений при контрастных условиях орошения у линии S29 (821 5A) и сорта ‘Саратовская 29’ (условия теплицы)**

Table 2. **Two-way analysis of variance showing mean values of plant productivity components under contrasting irrigation conditions in line S29 (821 5A) and cv. ‘Saratovskaya 29’ (greenhouse conditions)**

Генотипы	Длина стебля, см		F_E	$НСР_{05}$	Длина колоса, см		F_E	$НСР_{05}$
	контроль	засуха			контроль	засуха		
S29	99,0	92,6	19,0***	3,3	7,7	7,7	н/з	н/з
S29 (821 5A)	95,3	87,4			6,6	6,8		
F_G	4,4*	7,8**			72,1***	43,8***		
$НСР_{05}$	3,5	3,7			0,3	0,3		

Генотипы	Число колосков в колосе		F_E	$НСР_{05}$	Число зерен в главном колосе		F_E	$НСР_{05}$
	контроль	засуха			контроль	засуха		
S29	13,6	13,9	11,9***	0,5	25,8	25,4	н/з	н/з
S29 (821 5A)	12,9	13,0			23,0	21,7		
F_G	13,0***	21,6***			8,5**	17,2***		
$НСР_{05}$	0,3	0,3			1,9	1,8		

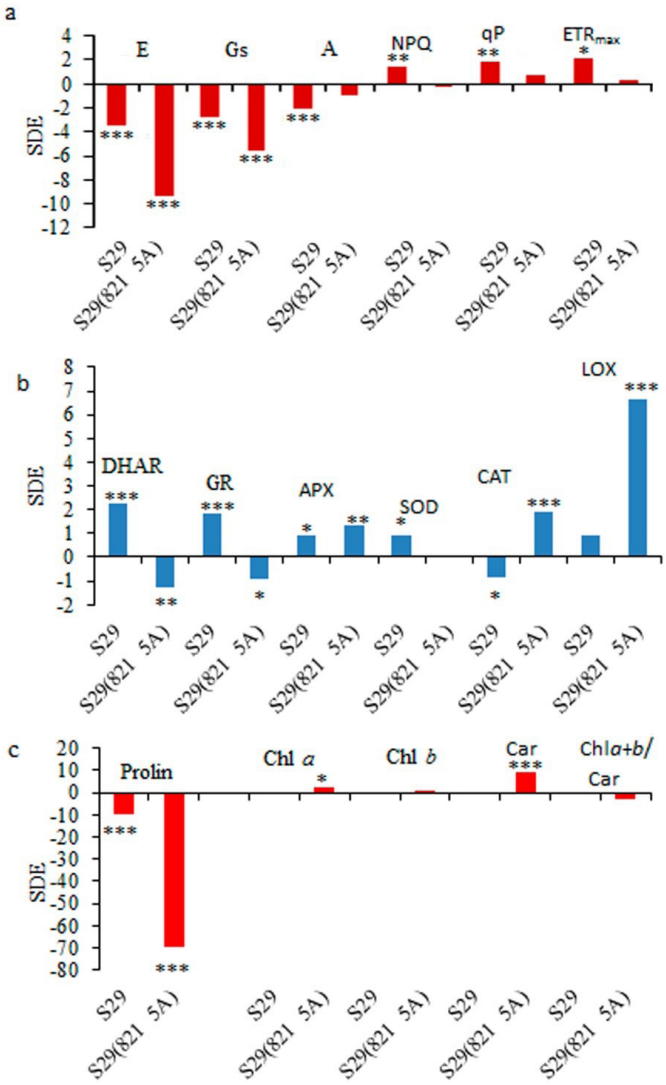
Генотипы	Масса зерен с главного колоса, г		F_E	$НСР_{05}$	Масса 1000 зерен главного колоса, г		F_E	$НСР_{05}$
	контроль	засуха			контроль	засуха		
S29	1,12	0,82	33,0***	0,09	43,2	30,9	119,8***	2,1
S29 (821 5A)	0,89	0,66			38,7	27,5		
F_G	30,6***	20,3***			19,9***	18,9***		
$НСР_{05}$	0,09	0,06			2,0	1,6		

Генотипы	Число зерен с растения		F_E	$НСР_{05}$	Масса зерен с растения, г		F_E	$НСР_{05}$
	контроль	засуха			контроль	засуха		
S29	90,3	57,3	47,9***	9,8	3,53	1,69	82,4***	0,34
S29 (821 5A)	87,5	51,8			2,96	1,44		
F_G	н/з	н/з			6,9***	6,6***		
$НСР_{05}$	н/з	н/з			0,3	0,19		

Генотипы	Масса 1000 зерен, г		F_E	$НСР_{05}$
	контроль	засуха		
S29	40,4	27,3	67,0***	5,3
S29 (821 5A)	31,6	23,8		
F_G	20,5***	11,3**		
$НСР_{05}$	2,7	2,0		

Примечание: F_G – F-критерий Фишера для генотипа; F_E – F-критерий Фишера для среды; $НСР_{05}$ – наименьшая существенная разность для 5-процентного уровня значимости; н/з – различия незначимы; *, **, *** – $p < 0,05$, 0,01 и 0,001 соответственно

Note: F_G – Fisher’s criterion for the genotype; F_E – Fisher’s criterion for the environment; LSD_{05} – least significant difference for 5% significance level; н/з – differences are insignificant; *, **, and *** – $p < 0.05$, 0.01 and 0.001, respectively



*, **, *** – $p < 0,05$, 0,01 и 0,001, значимость различий между признаками в контроле и на засухе; E – скорость транспирации, Gs – устьичная проводимость, A – скорость ассимиляции CO_2; NPQ – коэффициент нефотохимического тушения флуоресценции, qP – коэффициент фотохимического тушения флуоресценции, ETR_{max} – максимальная скорость транспорта электронов; Chl, Car, Prolin – содержание хлорофилла, каротиноидов, пролина в листьях; DHAR, GR, SOD, APX, CAT, LOX – активность дегидроаскорбатредуктазы, глутатионредуктазы, супероксиддисмутазы, аскорбатпероксидазы, каталазы и липоксигеназы

*, **, *** – $p < 0.05$, 0.01 and 0.001, significance of differences between traits in the control and drought tests; E – transpiration rate, Gs – stomatal conductance, A – CO_2 assimilation rate; NPQ is the coefficient of non-photochemical fluorescence quenching, qP is the coefficient of photochemical fluorescence quenching, ETR_{max} is the maximum electron transport rate; Chl, Car, Prolin – content of chlorophyll, carotenoids and proline in leaves; DHAR, GR, SOD, APX, CAT, LOX are the activities of dehydroascorbate reductase, glutathione reductase, superoxide dismutase, ascorbate peroxidase, catalase, and lipoxygenase

Рисунок. Размер эффекта засухи (SDE) для параметров газообмена и флуоресценции хлорофилла (a), активности антиоксидантных ферментов и липоксигеназы (b), содержания пролина и фотосинтетических пигментов (c) у сорта 'Саратовская 29' и линии S29 (821 5A)

Figure. The size of the drought effect (SDE) on gas exchange parameters and chlorophyll fluorescence (a), antioxidant enzyme and lipoxygenase activity (b), proline and photosynthetic pigment content (c) in cv. 'Saratovskaya 29' and line S29 (821 5A)

ствии стрессовых факторов и служат защитой фотосинтетического аппарата от деструкции под действием активных форм кислорода (Goltsev et al., 2016).

У сорта S29 при засухе повышались уровни активности четырех ферментов аскорбат-глутатионового цикла (DHAR, GR, APX и SOD), тогда как у линии S29 (821 5A) – только одного (APX). Таким образом, у S29 процесс восстановления окисленных молекул аскорбиновой кислоты и глутатиона в условиях засухи был значительно более активным, как и в целом аскорбат-глутатионовый цикл. Для противостояния стрессу у линии в условиях засухи повышались уровни активности каталазы и липоксигеназы (рисунок, b). Также большие различия между генотипами обнаружены в значениях SDE, рассчитанного для содержания свободного пролина и каротиноидов (рисунок, c). Поскольку сорт S29 и линия S29 (821 5A) вы-

ращивались в контролируемых условиях, описанные различия в защитных реакциях на стресс от засухи связаны, по-видимому, с интрогрессией в хромосому 5AL от *T. timopheevii* subsp. *timopheevii.* По ростовым параметрам и показателям зерновой продуктивности в условиях засухи линия также значительно уступала сорту S29 (табл. 2).

Сорт мягкой пшеницы 'Саратовская 29' отличается высокой засухоустойчивостью, превосходным качеством зерна и используется для создания новых сортов с комплексной устойчивостью к абиотическим и биотическим стрессовым факторам путем гибридизации с другими видами. Интрогрессивная гибридизация сорта S29 и тетраплоидной пшеницы *T. timopheevii* subsp. *timopheevii* применялась с целью повышения устойчивости сорта S29 к фитопатогенам. Интрогрессии от *T. timopheevii* subsp. *timopheevii* в разные участки генома пшеницы сорта S29 дали положительный результат в достижении устойчивости к биотическим стрессорам (Leonova, Shumny, 2023).

Однако не все полученные интрогрессивные линии отвечают современным требованиям комплексной устойчивости к неблагоприятным факторам среды. У линии S29 (821 5A), в геноме которой интрогрессия от *T. timopheevii* subsp. *timopheevii* затронула дистальный участок хромосомы 5AL, заметно снизились устойчивость к засухе и продуктивность по сравнению с сортом-реципиентом S29. Наиболее существенные негативные изменения коснулись активности ферментов аскорбат-глутатионового цикла и признаков «масса зерна с растения» и «масса 1000 зерен с растения», независимо от условий выращивания. Предположительно, район хромосомы 5AL, несущий интрогрессию от *T. timopheevii* subsp. *timopheevii*, связан с генетическим контролем регуляции защитных реакций на дефицит воды и процессов онтогенеза. Хромосомная модификация этого района у сорта S29 негативно повлияла на формирование и налив зерна главного колоса.

Результаты этого исследования и данные о влиянии интрогрессии от *T. timopheevii* subsp. *timopheevii* в хромосому 5AL на характеристики опушения листа (Simonov et al., 2021) подтверждают взаимосвязь между развитием листовых трихом и защитными клеточными реакциями на абиотические стрессоры, особенно на засуху. Количество доказательств такой взаимосвязи у мягкой пшеницы увеличивается. Так, H. Fan и соавторы (Fan et al., 2023) предложили несколько кандидатных генов, влияющих на развитие трихом, по результатам картирования локусов количественных признаков для количества и длины листовых трихом у пшеницы *T. aestivum*, выращенной в двух провинциях Китая. Среди них были гены белков, участвующих в регуляции реакций на биотические и абиотические стрессоры, такие как киназы, переносчики фосфатидилинозитола, глутатионпероксидазы и другие. Засуха значительно индуцировала экспрессию этих генов. Также обнаружилась взаимосвязь между характеристиками опушения листа и показателями флуоресценции хлорофилла у семи сортов и линий пшеницы, имеющих генетически различное опушение листа (Pshenichnikova et al., 2019).

Наличие взаимосвязи между развитием трихом и устойчивостью к стрессовым факторам необходимо учитывать при оценке перспективности новых генотипов пшеницы, созданных с привлечением генетического материала других видов. Изменение характеристик опушения листа пшеницы при межвидовой гибридизации может повлечь за собой изменение устойчивости к стрессовым факторам. Чтобы оценить степень и характер этих изменений, необходимо подробное изучение устойчивости новых межвидовых гибридов. Влияние интрогрессии от *T. timopheevii* subsp. *timopheevii* в хромосому 5AL может быть сортоспецифичным, поскольку существует внутривидовая вариабельность генома, обусловленная обширными структурными и гаплотипическими различиями между сортами мягкой пшеницы (Walkowiak et al., 2020). Поэтому необходимо оценить влияние интрогрессии в этот участок хромосомы 5A на устойчивость и продуктивность сортов пшеницы с отличными от сорта 'Саратовская 29' характеристиками опушения листа.

Заключение

Для понимания перспективности дальнейшего использования в селекции мягкой пшеницы межвидовой гибридной линии S29 (821 5A) с сегментом интрогрессии от *T. timopheevii* subsp. *timopheevii* в дистальном участке хромосомы 5AL изучен набор показателей фотосинтеза, активности антиоксидантных ферментов и липоксигеназы, содержания пролина в листьях и компонентов продуктивности. Показано, что интрогрессивная линия S29 (821 5A) значительно уступала сорту-реципиенту мягкой пшеницы 'Саратовская 29' по устойчивости к почвенной засухе и по продуктивности, что необходимо учитывать при ее использовании в селекции.

Комплексная оценка устойчивости новых межвидовых гибридов с помощью физиолого-биохимических критериев необходима для выявления негативных эффектов интрогрессивной гибридизации, особенно в случаях изменения характеристик опушения листа у новых генотипов.

References / Литература

Bates L., Waldren R.P., Teare I.D. Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil*. 1973;39:205-207. DOI: 10.1007/BF00018060

Chakraborty P., Kumari A. Role of compatible osmolytes in plant stress tolerance under the influence of phytohormones and mineral elements. In: M.A. Ahanger, J.A. Bhat, P. Ahmad, R. John (eds). *Improving Stress Resilience in Plants: Physiological and Biochemical Basis and Utilization in Breeding*. Cambridge, MA: Academic Press; 2023. p.165-201. DOI: 10.1016/B978-0-443-18927-2.00011-X

Fan H., Xu J., Ao D., Jia T., Shi Y., Li N. et al. QTL mapping of trichome traits and analysis of candidate genes in leaves of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Genes (Basel).* 2023;15(1):42. DOI: 10.3390/genes15010042

Goltsev V.N., Kalaji H.M., Paunov M., Bąba W., Horaczek T., Mojski J. et al. Variable chlorophyll fluorescence and its use for assessing physiological condition of plant photosynthetic apparatus. *Russian Journal of Plant Physiology.* 2016;63(6):869-893. DOI: 10.1134/S1021443716050058

Kabir N., Wahid S., Rehman S.U., Qanmber G. The intricate world of trichome development: From signaling pathways to transcriptional regulation. *Environmental and Experimental Botany*. 2024;217:105549. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2023.105549

Leonova I.N., Röder M.S., Kalinina N.P., Budashkina E.B. Genetic analysis and localization of loci controlling leaf rust resistance of *Triticum aestivum* × *Triticum timopheevii* introgression lines. *Russian Journal of Genetics*. 2008;44(12):1431-1437. DOI: 10.1134/S1022795408120077

Leonova I.N., Shumny V.K. Development and study of the common wheat introgression lines obtained with the participation of *Triticum timopheevii* (Zhuk.) Zhuk. *Letters to Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2023;9(3):111-116. [in Russian] (Леонова И.Н., Шумный В.К. Создание и изучение коллекции интрогрессивных линий мягкой пшеницы, полученных с участием *Triticum timopheevii* (Zhuk.) Zhuk. *Письма в Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2023;9(3):111-116). DOI: 10.18699/LettersVJ-2023-9-14

Mir R.A., Khah M. K. Recent progress in enzymatic antioxidant defense system in plants against different environmental stresses. In: M.A. Ahanger, J.A. Bhat, P. Ahmad, R. John (eds). *Improving Stress Resilience in Plants: Physiological and Biochemical Basis and Utilization in Breeding*. Cambridge, MA: Academic Press; 2023. p. 203-224. DOI: 10.1016/B978-0-443-18927-2.00014-5

Osipova S.V., Rudikovskii A.V., Permyakov A.V., Rudikovskaya E.G., Pomortsev A.V., Musalevskaya O.V. et al. Using chlorophyll fluorescence parameters and antioxidant enzyme activity to assess drought tolerance of spring wheat. *Photosynthetica*. 2024;62(2):147-157. DOI: 10.32615/ps.2024.014

Panda D., Mishra S.S., Behera P.K., Lenka S.K. Role of ascorbate and ascorbate–glutathione cycle for photosynthetic protection in selected indigenous rice landraces under drought stress. *Agricultural Research*. 2021;10:187-192. DOI: 10.1007/s40003-020-00506-y

Peršić V., Ament A., Antunović Dunić J., Drezner G., Cesar V. PEG-induced physiological drought for screening winter wheat genotypes sensitivity – integrated biochemical and chlorophyll *a* fluorescence analysis. *Frontiers in Plant Science*. 2022;13:987702. DOI: 10.3389/fpls.2022.987702

Pflüger T., Jensen S.M., Liu F., Rosenqvist E.T. Leaf gas exchange responses to combined heat and drought stress in wheat genotypes with varied stomatal density. *Environmental and Experimental Botany*. 2024;228(Pt A):105984. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2024.105984

Pshenichnikova T.A., Doroshkov A.V., Osipova S.V., Permyakov A.V., Permyakova M.D., Efimov V.M. et al. Quantitative characteristics of pubescence in wheat (*Triticum aestivum* L.) are associated with the parameters of gas exchange and chlorophyll fluorescence under conditions of normal and limited water supply. *Planta*. 2019;249(3):839-847. DOI: 10.1007/s00425-018-3049-9

Shchukina L.V., Simonov A.V., Demenkova M.A., Klykov A.G., Shamanin V.P., Pozherukova V.E. et al. Increased grain protein and gluten contents of bread wheat caused by introgression of a *T. timopheevii* segment into chromosome 2A. *Euphytica*. 2022;218(12):170. DOI: 10.1007/s10681-022-03121-w

Simonov A.V., Smirnova O.G., Genaev M.A., Pshenichnikova T.A. The identification of a new gene for leaf pubescence introgressed into bread wheat from *Triticum timopheevii* Zhuk. and its manifestation in a different genotypic background. *Plant Genetic Resources: Characterization and Utilization*. 2021;19(3):238-244. DOI: 10.1017/S1479262121000277

Smirnova O.G., Pshenichnikova T.A. The relationship between the genetic status of the *Vrn-1* locus and the size of the root system in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2021;25(8):805-811. DOI: 10.18699/VJ21.093

Viswanath K.K., Varakumar P., Pamuru R.R., Basha S.J., Mehta S., Rao A.D. Plant lipoxygenases and their role in plant physiology. *Journal of Plant Biology*. 2020;63(2):83-95. DOI: 10.1007/s12374-020-09241-x

Walkowiak S., Gao L., Monat C., Haberer G., Kassa M.T., Brinton J. et al. Multiple wheat genomes reveal global variation in modern breeding. *Nature*. 2020;588(7837):277-283. DOI: 10.1038/s41586-020-2961-x

Информация об авторах

Светлана Владимировна Осипова, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Сибирский институт физиологии и биохимии растений Сибирского отделения Российской академии наук, 664033 Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 132, заведующая кафедрой, Иркутский государственный университет, 664011 Россия, Иркутск, ул. Сухэ-Батора, 5, svetlanaosipova2@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7025-8590

Алексей Викторович Пермяков, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Сибирский институт физиологии и биохимии растений Сибирского отделения Российской академии наук, 664033 Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 132, aperm@sifibr.irk.ru, https://orcid.org/0000-0003-0002-5470

Александр Викторович Рудиковский, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Сибирский институт физиологии и биохимии растений Сибирского отделения Российской академии наук, 664033 Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 132, Rudikovalex@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8567-0318

Марина Диомидовна Пермякова, доктор биологических наук, старший научный сотрудник, Сибирский институт физиологии и биохимии растений Сибирского отделения Российской академии наук, 664033 Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 132, marperm@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-0259-8531

Елена Георгиевна Рудиковская, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Сибирский институт физиологии и биохимии растений Сибирского отделения Российской академии наук, 664033 Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 132, Rudal69@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5709-2370

Анатолий Владимирович Поморцев, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Сибирский институт физиологии и биохимии растений Сибирского отделения Российской академии наук, 664033 Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 132, pomorcevanatolii@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8025-7647

Татьяна Алексеевна Пшеничникова, кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник, заведующая сектором, Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 19, wheatpsh@bionet.nsc.ru, https://orcid.org/0000-0001-5639-916X

Information about the authors

Svetlana V. Osipova, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, Institute of Plant Physiology and Biochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 132 Lermontova St., Irkutsk 664033, Russia, Head of a Department, Irkutsk State University, 5 Sukhe-Batora St., Irkutsk 664011, Russia, svetlanaosipova2@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7025-8590

Aleksey V. Permyakov, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Institute of Plant Physiology and Biochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 132 Lermontova St., Irkutsk 664033, Russia, aperm@sifibr.irk.ru, https://orcid.org/0000-0003-0002-5470

Alexandr V. Rudikovskii, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Institute of Plant Physiology and Biochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 132 Lermontova St., Irkutsk 664033, Russia, Rudikovalex@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8567-0318

Marina D. Permyakova, Dr. Sci. (Biology), Senior Researcher, Institute of Plant Physiology and Biochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 132 Lermontova St., Irkutsk 664033, Russia, marperm@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-0259-8531

Elena G. Rudikovskaya, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Institute of Plant Physiology and Biochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 132 Lermontova St., Irkutsk 664033, Russia, Rudal69@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5709-2370

Anatolii V. Pomortsev, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Institute of Plant Physiology and Biochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 132 Lermontova St., Irkutsk 664033, Russia, pomorcevanatolii@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8025-7647

Tatyana A. Pshenichnikova, Cand. Sci. (Biology), Head of a Sector, Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10 Akademika Lavrentyeva Ave., Novosibirsk 630090, Russia, wheatpsh@bionet.nsc.ru, https://orcid.org/0000-0001-5639-916X

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 13.03.2025; одобрена после рецензирования 22.06.2025; принята к публикации 09.07.2025.
The article was submitted on 13.03.2025; approved after reviewing on 22.06.2025; accepted for publication on 09.07.2025.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 633.521:67.05
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-112-126

CC BY

Методика определения качества волокна льна по малым пробам с использованием универсальной разрывной машины Instron 5943

А. В. Павлов, Н. Б. Брач, Е. А. Пороховинова, Е. К. Хлесткина

Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Елизавета Александровна Пороховинова, e.porohovinova@vir.nw.ru

Актуальность. Длительное время селекция льна-долгунца была направлена на повышение урожайности волокна, что привело к ухудшению его качества. Для анализа качественных характеристик волокна требуется значительное его количество, что замедляет селекционный процесс. Необходима надежная методика оценки, позволяющая выявлять ценные генотипы при анализе небольшого количества материала.
Материалы и методы. Проанализированы 53 образца волокна, представляющие линейку по разрывной нагрузке (от 11 до 39 даН), по действующей (стандартной) и созданной нами (новой) методикам. Разработанная методика максимально приближена к стандартной. Отличия связаны с заменой устаревшего прибора ДВК60 на современное оборудование – Instron 5943, что позволяет уменьшить навеску единичной пробы в 6,5 раз. Изменения также коснулись методики отбора волокна для определения тонины.
Результаты. Новая методика незначительно завышает показатели: по разрывной нагрузке и относительной разрывной нагрузке расчетной (ОРНр) – на 9%, гибкости – на 12%, тонины – на 13%. Корреляционный анализ выявил большое сходство результатов, полученных по стандартной и новой методикам: разрывная нагрузка (r = 0,88), ОРНр (r = 0,83), гибкость (r = 0,67), тонина (r = 0,69). Дисперсионный анализ показал достоверное высокое влияние генотипа на результаты оценки волокна по разрывной нагрузке (92%), гибкости (75%), тонины (78%) и ОРНр (83%).
Заключение. Результаты, полученные по новой методике, сопоставимы с данными стандартной оценки. Методика позволит достоверно оценивать качество волокна у селекционного материала уже на 1–2-й год размножения одного растения, что уменьшит трудозатраты, ускорит отбор ценных генотипов.

Ключевые слова: *Linum usitatissimum*, лен-долгунец, лен чесаный, оценка на начальных этапах селекции, приборная оценка

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту № FGEM-2022-0005 «Растительные ресурсы масличных и прядильных культур ВИР как основа теоретических исследований и их практического использования».
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Павлов А.В., Брач Н.Б., Пороховинова Е.А., Хлесткина Е.К. Методика определения качества волокна льна по малым пробам с использованием универсальной разрывной машины Instron 5943. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(3):112-126. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-112-126

© Павлов А.В., Брач Н.Б., Пороховинова Е.А., Хлесткина Е.К., 2025

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-112-126

Flax fiber quality estimation technique for small samples using the Instron 5943 universal breaking device

Andrey V. Pavlov, Nina B. Brutch, Elizaveta A. Porokhovinova, Elena K. Khlestkina

N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: Elizaveta A. Porokhovinova, e.porohovinova@vir.nw.ru

Background. Fiber flax breeding was for a long time targeted at increasing the fiber yield that entailed deterioration in its quality. A significant amount of fiber is required for the analyses of its quality characteristics, which slows down the breeding process. A reliable assessment technique is needed to select valuable genotypes by analyzing small amounts of material.
Materials and methods. Fifty-three fiber samples representing the breaking load range (from 11 to 39 daN) were analyzed with two tools: the conventional method (standard) and the proposed (new) one. The technique we have developed is as close as possible to the standard one. The differences are in the replacement of the outdated DVK60 device with modern equipment, Instron 5943, which reduced the weight of a single sample 6.5 times. This substitution also affected the fiber selection procedure for assessing its fineness.
Results. The new technique slightly overestimated the indicators: by 9% in breaking and rated relative breaking loads, 12% in flexibility, and 13% in fineness. Correlation analysis revealed high similarity between the results obtained with the standard and new methods (r = 0.88 for the breaking load, r = 0.83 for the rated relative breaking load, r = 0.67 for flexibility, and r = 0.68 for fineness). Analysis of variance showed a high significant effect of the genotype on the assessment results for the breaking load (92%), flexibility (75%), fineness (78%), and the rated relative breaking load (83%).
Conclusion. The results obtained with the new technique are comparable with the evaluation data quantified according to standard procedure. It will provide reliable assessment of fiber quality in breeding material as early as in the 1st or 2nd year of seed reproduction from a single plant, which will reduce labor costs and accelerate selection of valuable genotypes.

Keywords: *Linum usitatissimum*, fiber flax, combed flax, assessment at initial breeding stages, instrumental assessment

Acknowledgements: the experiments were conducted within the framework of the state task according to the theme plan of VIR, Project No. FGEM-2022-0005 “Plant resources of oil and fiber crops at VIR as the basis for theoretical research and their practical utilization”.
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Pavlov A.V., Brutch N.B., Porokhovinova E.A., Khlestkina E.K. Flax fiber quality estimation technique for small samples using the Instron 5943 universal breaking device. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(3):112-126. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-112-126

Введение

К настоящему времени в селекции льна-долгунца достигнуты значительные результаты: созданы сорта, устойчивые к основным болезням, обладающие высокой урожайностью соломы и семян, высоким содержанием волокна в стебле, которое, вероятно, уже приближается к своему биологическому пределу. Однако длительный отбор на повышение урожайности не сопровождался достаточным контролем качественных характеристик волокна и выделением форм, сочетающих в себе все наилучшие показатели. Это привело к ухудшению потребительских свойств производимой продукции. Одной из причин данной ситуации является невозможность эффективного отбора селекционных образцов из-за отсутствия методик достоверной оценки характеристик качества волокна на небольшом количестве материала. Качество пряжи, вырабатываемой из льняного волокна, зависит в основном от таких его характеристик, как разрывная нагрузка, гибкость и тонина, которые определяют его прядильную способность.

В настоящее время существует множество различных методик предварительной оценки качества волокна льна. Все их можно разделить на две группы: без выделения волокна и с его выделением из стебля.

К первой группе относится оценка растений по морфологическим признакам. Она основана на предположении, что отбор лучших растений по показателям качества волокна можно вести на основании внешних признаков структуры растения. К ним относят общую высоту растения и техническую длину стебля, мыклость – отношение технической длины стебля к его диаметру, сбежистость – разность между диаметром стебля у семядольного колена и диаметром основания соцветия, количество листьев на стебле и другие признаки. Например, существует метод, который базируется на анализе средней длины междоузлия, ширины листового следа и диаметра стебля в вершинной, средней и комлевой части (Pashina, Pashin, 2009). Другой метод – автоматическая комплексная оценка качества, учитывающая среднюю общую длину стеблей, мыклость и удельную сбежистость по фотоизображению (Fedosova et al., 2012).

К данной группе относится и анатомический метод, основанный на анализе поперечного среза стебля льна. Он дает представление о количестве и качестве волокна, устойчивости к полеганию, продуктивности растения. Хорошим качеством обладают стебли, в которых техническое волокно состоит из некрупных на поперечном срезе, ровных по диаметру элементарных волокон граненой формы, которые плотно расположены в пучке, имеют толстые стенки, небольшой внутренний просвет, с минимальной степенью одревеснения (Duktova et al., 2014). Утолщение стенок элементарных волокон приводит к повышению гибкости волокна, однако при увеличении их диаметра наблюдается обратный эффект. Увеличение гибкости волокна способствует повышению прочности, но лишь до определенного предела, достигая максимума при значениях гибкости, равных 75–85 мм. Таким образом, наилучшими показателями обладает волокно, состоящее из клеток, диаметр которых находится в диапазоне 17–21 мкм при толщине их стенок не менее 7–10 мкм (Khlopov, 2018).

Использование микрофокусной рентгенографии, основанной на анализе оптической плотности отрезков стеблей льна, позволяет проводить отбор селекционного материала по содержанию волокна. На базе таких изображений можно разработать программное обеспечение и проводить анализ снимков в автоматическом режиме (Bolshakova et al., 2016).

Ко второй группе оценки качества выделенного волокна относится органолептический метод, который включает субъективную экспертную оценку показателей, таких как тяжесть, мягкость, маслянистость, прочность, тонина и др. Этот метод требует минимальных временных затрат и основывается исключительно на знаниях и опыте эксперта (Dyagilev et al., 2015). К данной группе относится и действующая (стандартная) методика оценки, используемая нами при изучении коллекции льна ВИР (Arno et al., 1961).

С развитием технологий появляются и новые методы оценки, которые базируются на использовании современной приборной базы. Метод ближней инфракрасной спектроскопии (БИК) позволяет определить содержание целлюлозы в волокне. Качественное льняное волокно должно содержать не менее 70–80% целлюлозы. БИК-спектроскопия может служить альтернативой классическим методам определения содержания целлюлозы в волокне и костре (Belopukhov et al., 2017).

Термогравиметрический анализ позволяет с высокой точностью определять содержание основных полимерных компонентов волокна: целлюлозы, лигнина, гемицеллюлозы, пектиновых веществ, а также воды и зольных элементов, от которых зависят качественные характеристики волокна. Сканирующая электронная микроскопия позволяет оценить морфологические особенности микрофибрилл льноволокна и структурных компонентов стебля (Titok et al., 2006).

В зарубежных странах для определения показателей качества волокна применяют оборудование, используемое в текстильной промышленности. Так, для определения разрывной нагрузки применяют Statimatme (Германия), Instron (США), тонину устанавливают эталонным методом и методом воздушного потока, цвет волокна – спектрофотометром (Shimanskaya et al., 2020).

Существующие методы оценки волокна характеризуются значительной продолжительностью анализов и недостаточной точностью, они не в полной мере учитывают такой показатель, как прядильная способность волокна, на которую оказывает большое влияние невыравненность элементарных волокон в техническом волокне. При этом учитывается и такой показатель, как тонина волокна, а также коэффициент ее варьирования, что позволяет повысить эффективность отбора в процессе селекции (Pashin, Popova, 2024).

Все перечисленные методы имеют как положительные, так и отрицательные стороны: одни из них доступны и относительно нетрудоемки, но слабо достоверны, другие – очень трудозатратны, требуют специального дорогостоящего оборудования, но также не гарантируют достоверности результата.

Метод оценки волокна по его прядильной способности, без сомнения, является наиболее точным и достоверным, но он неприменим на начальных этапах селекции из-за отсутствия достаточного количества волокна. По нашему мнению, на втором месте по точности стоит приборная методика оценки, которая учитывает все основные показатели качества волокна. Однако приборная база, которая была инновационной для середины XX века, к настоящему времени устарела, что особенно актуально при анализе генотипов на начальных этапах селекции, когда имеется небольшое количество материа-

ла. При этом ГОСТ (GOST R 53484-2009, 2010), который распространяется на длинное трепаное льняное волокно, получаемое в результате заводской и не заводской обработки тресты, предписывает использовать прежнюю приборную базу. Поэтому *целью нашей работы* явилась разработка новой методики, которая была бы максимально приближена и не входила в противоречие со стандартной, но позволяла бы проводить технологическую оценку селекционного материала льна на 1–2 года раньше обычного, показывая сопоставимые результаты.

Материал и методы

Материал

По состоянию на 2024 г. коллекция льна-долгунца ВИР превышает 2500 образцов. В ней представлено широкое разнообразие образцов по всем изучаемым морфологическим (окраска венчика, семян) и хозяйственно ценным (высота растения, техническая длина, урожай соломы, волокна, семян, выход длинного и всего волокна, разрывная нагрузка, гибкость, тонина, относительная разрывная нагрузка расчетная (ОРНр), номер волокна) признакам. Однако из них лишь малое количество превосходит сорта-стандарты по комплексному сочетанию показателей качества волокна в стебле. Материалом для исследований послужили 43 образца льна-долгунца из основной и генетической коллекций ВИР, различающихся по характеристикам качества волокна. Кроме того, в опыте изучены сорта-стандарты: ‘Светоч’ (к-5333) в трех повторностях, ‘К-6’ (к-6815) в двух повторностях и ‘Призыв 81’ (к-7472) в пяти повторностях. Таким образом, общее количество проанализированного материала составило 53 образца (табл. 1).

В экспериментах использовали волокно, выделенное методом тепловой мочки из образцов, выращенных на полях научно-производственной базы (НПБ) «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» в 2010 г. Данное волокно проанализировали в 2011 г. по стандартной методике (Arno et al., 1961) с использованием гибкомера (Г-2) и динамометра (ДВК60). В дальнейшем весь материал хранили в сухом помещении без доступа света. В 2020 г. из него отобрали 53 образца. Набор представлял собой «линейку» по разрывной нагрузке волокна от минимума до максимума (через равные интервалы) – от 11 до 39 даН (Electronic Supplementary Materials, Suppl.)[1].

Стандартная методика определения качества волокна

Для оценки качества волокна по стандартной методике проводятся следующие стандартные процедуры.

▪ Подготовка проб:

• из средней части длинного чесаного волокна вырезается отрезок 27 см;

• из этого отрезка волокна (27 см) готовят 15 навесок по 420 мг для определения гибкости и разрывной нагрузки, а также 1 навеску 4–5 г для определения тонины;

• навески укладывают в специальные книжки и помещают под 5 кг груза на 10 часов для выпрямления, при температуре воздуха 20°С и влажности 60–65%.

• Гибкость волокна (**Flex_Old**, мм) измеряется по свободному провисанию обоих концов пряди с помощью прибора Г-2, показывающего отклонения от горизонтали концов испытуемого образца при свободном провисании.

• Измерение разрывной нагрузки прядок (**Strength_Old**, даН) проводится на динамометре ДКВ60 после определения их гибкости.

• Таким образом, для определения гибкости и разрывной нагрузки выполняют 795 (53 × 15) анализов.

▪ Определение тонины (**Fin_Old**) проводят по следующему алгоритму:

• подготовленную прядку весом 4–5 г и длиной 27 см разрезают на 2 части на расстояние от середины в сторону ее вершины 1–2 см;

• более длинную (комлевую) часть пробы делят на 3 прядки, каждую прочесывают на длину 4–5 см от обрезанного края с помощью специального гребня (10 игл на 1 см);

• отступив 1–2 см от края обрезанной прядки, делают вырезку длиной 1 см, из каждой вырезки берется одна навеска весом 10 мг;

• в каждой навеске (весом 10 мг) подсчитывают количество технического волокна (**N_technF**);

• определяют среднее значение числа технических волокон для трех навесок по формуле [1]. Это значение показывает среднюю длину волокна (в см) весом 10 мг, что соответствует тонине, измеряемой в м/г:

$$\textbf{Fin_Old} = \textbf{10 мм} \times \textbf{N_technF} / \textbf{10 мг; м/г} \quad [1],$$

где **Fin_Old** – тонина волокна, измеренная по стандартной методике; **N_technF** – количество волокон; 10 мм – длина навески; 10 мг – масса навески.

Таким образом, для определения тонины выполняют 159 (53 × 3) анализов.

▪ Относительную расчетную разрывную нагрузку (ОРНр – **Qc_Old**) вычисляют по формуле [2]:

$$\textbf{Qc_Old} = 0{,}2 \times \textbf{Strength_Old} + 0{,}1 \times \textbf{Flex_Old} + 0{,}013 \times \textbf{Fin_Old} + 2{,}1 \quad [2],$$

где **Qc_Old –** ОРНр; **Strength_Old** – разрывная нагрузка, даН; **Flex_ Old** – гибкость (мм); **Fin_Old** – тонина, измеренные по стандартной методике.

Статистическая обработка данных

Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием программ MS Excel 10.0 и Statistica 7.0 (http://statsoft.ru/home/textbook/default.html). Число классов (Ivanter, Korosov, 2003) при ранжировании средних значений признаков качества волокна выборки образцов льна определяли по формуле [3]:

$$\mathbf{k} = 1 + 3{,}32 \times \lg(\mathbf{n}) \quad [3]$$

где **k** – количество классов; **n** – объем выборки.

При n = 53 количество классов (k) составляет 7.

Для выявления достоверности различий значений параметров качества волокна, оцененных по стандартной и новой методикам, использовали непараметрический U-критерий Манна – Уитни и параметрический – t-критерий Стьюдента (Nasledov, 2012). Для определения влияния генотипа и методики изучения на признаки качества волокна проводили двухфакторный дисперсионный анализ (Nasledov, 2012).

[1] Приложение представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2025-3-112-126 / See Electronic Supplementary Materials, Suppl., in the online version of this article: https://doi.org/110.30901/2227-8834-2025-3-112-126

Таблица 1. Список образцов льна, включенных в анализ
Table 1. The list of flax accessions used for the analyses

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Название / Name	Происхождение / Origin
к-6807[1]	'Оршанский 2'	Белоруссия, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по земледелию
к-7563	'Новоторжский'	Россия, Торжок, Институт льна –обособленное подразделение Федерального научного центра лубяных культур
к-7697	'Дашковский'	Белоруссия, Могилевская областная сельскохозяйственная опытная станция
к-7801	'Алексим'	Россия, Торжок, Институт льна –обособленное подразделение Федерального научного центра лубяных культур
к-8288	'Hermes'	Франция
к-8409	'Кинельский 2000'	Россия, Самарская область, Поволжский научно-исследовательский институт селекции и семеноводства им. П.Н. Константинова
к-8487	8212-9	Китай, Харбин, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences
к-8488	8643-10	– « –
к-8491	'Boreal'	Франция, Terre de Lin
к-8493	'Drakkar'	– « –
к-8494	'Alizee'	– « –
к-8495	'Melina'	– « –
к-8499	к-6084 × гк-21	Россия, Санкт-Петербург, ВИР
к-8502	гк-42 × к-7356	– « –
к-8504	'Добрыня'	Россия, Псков, Псковский НИИСХ – обособленное подразделение Федерального научного центра лубяных культур
к-8505	'Гладиатор'	Украина
к-8511	Y5I012	Китай, Чанша, Institute of Bast Fiber Crops, Chinese Academy of Agricultural Sciences"
к-8519	Y5I039	– « –
к-8529	Восход × Альфа, Л-1	Россия, пос. Михнево Московской обл. (бывшее Московское отделение ВИР)
к-8542	Родник × Балтучяй, Л-1	– « –
к-8544	Т-16 × Успех, Л-2	– « –
к-8546	1071/4 × Aoyagi, Л-3	– « –
к-8547	Сальдо × П-359	– « –
к-8550	Светоч 80000 Р	– « –
к-8551	П-255 НММ 0,06%, Л-1	– « –
к-8661	Согласие × Альфа, Л-1	– « –
к-8665	Светоч ДМС 0, 016%	– « –
к-8668	Y5I007	Китай, Чанша, Institute of Bast Fiber Crops, Chinese Academy of Agricultural Sciences
к-8875	Yuan 2003-51	– « –
к-8878	'Снежок'	Россия, Торжок, Институт льна – обособленное подразделение Федерального научного центра лубяных культур

Таблица 1. Окончание
Table 1. The end

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Название / Name	Происхождение / Origin
к-8582	гк-65, л-3 из к-3178, (Местный, Россия, Тверская губ.)[2]	Россия, Санкт-Петербург, генколлекция ВИР
к-8583	гк-79, л-1-2 из к-5408, (Печерский кряж, Россия)	– « –
к-8586	гк-109, л-3-2 из к-6099 ('Macovi M.A.G.', Аргентина	– « –
к-8588	гк-124, л-1 из к-6284 ('Stormont Motley', Северная Ирландия)	– « –
к-8595	гк-173, л-1 из 548145 '48254, Ottawa 2152', Германия)	– « –
к-8597	гк-391, л-1-2 из к-601679 ('Eyre', Австралия)	– « –
гк-2	л-1 из к-48 (селекции. Альтгаузена, Россия)	– « –
гк-22	л-3-2 из к-562 (Псковский кряж, Череповецкая губ.)	– « –
гк-130	л-1 из к-6577 ('Medra', ЧССР)	– « –
гк-146	л-1-1 из к-6988 (Франция)	– « –
гк-269	л-7 из к-7472 ('Призыв 81, Белоруссия, «Могилевская областная сельскохозяйственная опытная станция»)	Белоруссия, Институт льна (бывш. Белорусский НИИ земледелия) – дочернее подразделение Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по земледелию
гк-394	л-3 из и-595808 ('Linola', Канада)	Россия, Санкт-Петербург, генколлекция ВИР
гк-420	л-5 из и-601679 ('Eyre', Австралия)	– « –
к-5333.1[2]	'Светоч'	Россия, Торжок, Институт льна –обособленное подразделение Федерального научного центра лубяных культур
к-5333.2	'Светоч'	– « –
к-5333.3	'Светоч'	– « –
к-6815.1	'К-6'	Россия, Псков, Псковский НИИСХ – обособленное подразделение Федерального научного центра лубяных культур
к-6815.2	'К-6'	– « –
к-7472.1	'Призыв 81'	Белоруссия, Могилевская областная сельскохозяйственная опытная станция
к-7472.2	'Призыв 81'	– « –
к-7472.3	'Призыв 81'	– « –
к-7472.4	'Призыв 81'	– « –
к-7472.5	'Призыв 81'	– « –

Примечание: [1] – **к-** – номер по основному каталогу ВИР; **гк-** – номер по каталогу генетической коллекции ВИР; **и-** – номер по интродукционному каталогу ВИР; **л-** – линия из образца коллекции ВИР; в скобках указано происхождение образцов; [2] – «.1...5» – номер повторности сорта-стандарта

Note: [1] – **к-** marks the number in the main VIR catalogue; **гк-** marks the number in the VIR genetic collection catalogue; **и-** marks the number in the VIR introduction catalogue; **л-** denotes the line derived from an accession from the VIR collection; the origin of the accessions is parenthesized; [2] – ".1...5" denotes the repeat number of the reference cultivar

Результаты и обсуждение

Новая методика определения качества волокна

Для оценки качества волокна с применением нового оборудования нами усовершенствована старая методика. Ниже приводим ее подробное описание.

- Подготовка проб:
  - из средней части чесаного волокна, как и по стандартной методике, вырезают отрезок длиной 27 см;
  - из отрезка 27 см берут 10 навесок по 65 мг (в стандартной методике каждая навеска весит 420 мг);
  - навески укладывают в специальные книжки и помещают под 5 кг груза на 10 часов для выпрямления, при температуре воздуха 20°С и влажности 60–65%.
- Определение гибкости волокна (**Flex_New**, мм), как и при стандартной методике, измеряют по свободному провисанию обоих концов пряди с помощью прибора Г-2.
- С использованием универсальной машины Instron 5943 (США) и программы Bluehill Universal определяют разрывную нагрузку волокна.
  - Расстояние между клеммами прибора, как и при стандартной методике с использованием ДВК60, составляет 100 мм.
  - Данное оборудование позволяет делать замеры через каждые 0,2 секунды (от начала до полного разрыва волокна) – около 1000 точек.
  - Полученные данные обрабатываются с использованием макроса, созданного нами в среде MC Excel 2010, в результате которого определяется разрывная нагрузка как максимальная сила (**Strength_Inst**, Н), прикладываемая к волокну до его полного разрыва.
  - Полученные данные пересчитываются по стандартной методике, по формуле [4]:

$$\textbf{Strength_New} = \textbf{Strength_Inst} \times 420 / 65 / 10; \text{ даН [4]},$$

где **Strength_New** – разрывная нагрузка (даН) по новой методике, приведенная к стандартной методике оценки для навески в 420 мг; **Strength_Inst** – значение разрывной нагрузки (Н), полученное при разрыве прядки весом 65 мг; 420 – вес навески волокна по стандартной методике, мг; 65 – вес навески волокна по новой методике, мг; 10 – коэффициент для перевода данных в ньютонах (Н) в деканьютоны (даН).

- Таким образом, для определения гибкости волокна и разрывной нагрузки выполняют 530 (53 × 10) анализов.
- Для определения показателя тонины волокна:
  - используются те же навески, у которых определялась гибкость и разрывная нагрузка.
  - С противоположных концов каждой навески (после их испытания на Instron 5943), отступив от краев 1 см, делают вырезку длиной 1 см, то есть с одной навески берется две вырезки.
  - Вырезки используются целиком. Для сохранения возможности сравнения результатов, полученных по новой и стандартной методикам, масса вырезки рассчитывается: по навеске волокна весом 65 мг и длиной 27 см, (вместо 420 мг по стандартной методике). Таким образом, единичное волокно длиной 10 мм будет весить 2,4 мг, то есть при переходе на новую методику навеска составит 2,4 мг вместо 10 мг по стандартной методике.
  - Показатель тонины определяют путем подсчета количества технических волокон в двух вырезках каждой навески с последующим нахождением среднего значения для каждой навески и образца (из 10 навесок).
  - Такая методика анализа позволяет точнее учитывать коэффициент вариации и отбирать генотипы, более однородные по данному показателю. Полученные значения приводятся к параметрам, рассчитанным по стандартной методике по формуле [5]:

$$\textbf{Fin_New} = \textbf{N_technF} \times 10 / 2{,}4 \text{ [5]},$$

где **Fin_New** – тонина, измеренная по новой методике; **N_technF** – количество технических волокон в 2,4 мг навески; 10 – вес навески по стандартной методике, мг; 2,4 – вес навески по новой методике, мг.

Таким образом, для определения тонины выполняют 1060 (53 × 20) анализов.

- Относительная разрывная нагрузка (**Qc_New**) рассчитывается так же, как и по стандартной методике, по формуле [6]:

$$\textbf{Qc_New} = 0{,}2 \times \textbf{Strength_New} + 0{,}1 \times \textbf{Flex_New} + 0{,}013 \times \textbf{Fin_New} + 2{,}1 \text{ [6]},$$

где **Strength_New** – разрывная нагрузка, даН; **Flex_New** – гибкость, измеренная по новой методике, мм; **Fin_New** – тонина, измеренная по новой методике.

Сравнение характеристик волокна, полученных по стандартной и новой методикам

Для оценки по стандартной методике использовалось волокно, полученное с делянки площадью 1 м^2, по новой методике – с делянки 0,2 м^2. В таблице 2 приведены основные сравнительные характеристики, полученные с помощью этих методик.

В таблице 2 хорошо видны преимущества новой методики – это сокращение количества материала для анализа, лет изучения и площади делянки, необходимой для получения нужной навески волокна.

Современное оборудование позволяет получать дополнительную информацию о качественных характеристиках волокна: так, данные с Instron 5943 передаются на компьютер и сохраняются в виде таблиц и графиков. Наличие видеокамеры позволяет фиксировать процесс разрушения волокна на фотографиях и в видеоформатах (рис. 1).

Сходство результатов, полученных с использованием стандартной и новой методик, по исходным значениям (первичным данным) показателей качества волокна льна

Разработанная нами методика прошла апробацию на ранее оцененных по стандартной методике 53 образцах волокна (43 генотипах) льна, представляющих непрерывную «линейку» показателей по разрывной нагрузке.

Все показатели, полученные по новой методике, оказались незначительно завышены по сравнению со стандартной. Так, разрывная нагрузка и ОРНр увеличились на 9%, гибкость – на 12%, тонина – на 13%. При этом коэффициент вариации этих признаков внутри каждого образца увеличился в среднем в два раза, так как для анализа новой методикой использовали значительно меньшее количество волокна. Однако по показателям средних значений существенных различий между результатами, полученными с помощью разных методик,

Таблица 2. Сравнение параметров материала, анализируемого по стандартной и новой методикам
Table 2. Comparison of the material's parameters analyzed with the standard and new techniques

Параметр / Parameter	Методика / Technique		Изменение / Change
	стандартная / standard	новая / new	
Вес прядки волокна для одного анализа, мг	420	65	меньше в 6,5 раз
Длина прядки волокна для одного анализа, см	27	27	без изменений
Длина прядки между клеммами (участок, на который приходится нагрузка), см	10	10	без изменений
Количество проб для анализа одного генотипа	минимум 10	минимум 10	без изменений
Минимальная площадь делянки льна, необходимая для получения волокна, достаточного для инструментальной оценки одного генотипа	1 м^2 (12 рядков)	0,2 м^2 (1–2 рядка)	меньше в 6–12 раз
Количество лет, необходимых для размножения потомства одного растения до получения волокна достаточного веса, год	2–3	1–2	меньше в 1,5–2 раза

не наблюдалось (рис. 2; см. Electronic Supplementary Materials, Suppl.). Таким образом, использование новой методики позволит точнее отбирать выравненные образцы, которые имеют наименьший коэффициент вариации по показателям качества волокна.

Исследованную нами выборку из 53 образцов можно разделить по изученным признакам на 7 рангов (Ivanter, Korosov, 2004). Ранжирование средних данных, полученных по стандартной и созданной нами методикам, показало полное совпадение рангов средних значений признаков у трети выборки по измеряемым показателям разрывной нагрузки, гибкости и тонины. Более чем у половины выборки оказались аналогичными ранги средних значений для вычисляемой ОРНр. Если рассматривать интервал различий по каждому признаку в один ранг (от –1 до +1), то он охватывает от 77% (по гибкости) до 94% (по разрывной нагрузке) образцов от всей выборки. Различия на 2–3 ранга найдены только у 6% образцов по показателям разрывной нагрузки, 17% – по ОРНр, 19% – по гибкости и 23% – по тонине, что может свидетельствовать о большой неоднородности волокна у этих образцов. Небольшие различия приводят к незначительному завышению значений разрывной нагрузки и ОРНр, а также занижению тонины, что интересно, так как по параметрическим данным значения тонины повышены. Различия по гибкости носят симметричный характер. Более грубых несоответствий в ранжировании образцов по значениям признаков не обнаружено (табл. 3, рис. 3). Таким образом, использование ранжирования показало, что значения характеристик волокна, полученных по нашей методике, существенно не отличаются от оцененных стандартной методикой.

Различия показателей качества волокна образцов льна, проанализированных с помощью стандартной и новой методик (U-тест Манна – Уитни и t-критерий Стьюдента)

Использование ранжирования выборки, разделенной на крупные классы, выявило различия между стандартной и новой методиками, приводящие к незначительному завышению значений разрывной нагрузки и ОРНр и занижению тонины. Различия по показателям гибкости носили симметричный характер.

Достоверность выявленных различий оценивали с помощью U-критерия Манна – Уитни (непараметрический) и t-критерия Стьюдента (параметрический). Сопоставление признаков качества волокна в предложенной нами и стандартной методиках по этим критериям показало сходные результаты (табл. 4). Сравнение исходных данных выявило, что все показатели качества волокна по двум методикам достоверно отличаются друг от друга. По новой методике значения были выше, чем по стандартной.

Сравнение средних данных для каждого образца выявило достоверные различия по гибкости, тонине и ОРНр. По новой методике данные, как и в случае с исходными значениями, были выше, чем по стандартной. По разрывной нагрузке различия не достоверны. Это говорит о том, что данные по разрывной нагрузке, полученные с помощью предлагаемой методики, можно непосредственно использовать вместо стандартной.

Полученные же достоверные различия можно объяснить составом выборки, в которой исходные образцы представлены не перекрывающимися значениями, находящимися на примерно равном интервале относительно друг друга, а также большим числом измерений. Поэтому у каждого образца (в случае исходных данных) и внутри всей выборки (в случае средних значений) была очень малая дисперсия, обеспечивавшая достоверность даже небольших различий при использовании параметрических критериев. В случае применения непараметрического критерия негативную роль сыграло большое число измерений, которое привело к тому, что различие внутри ранжированных рядов данных носило случайный характер, поэтому даже небольшие различия в крайних данных в рангах привели к достоверности различий. Некоторые исследователи считают, что использование непараметрических критериев при выборке n > 100 нецелесообразно, даже если не выполняются некоторые исходные предположения применения параметрических методов (Nasledov, 2012).

Сходство результатов оценки генотипической изменчивости показателей качества волокна образцов льна, полученной по стандартной и новой методикам

Корреляционный анализ средних показателей данных, полученных с использованием стандартной и новой методик, показал высокое сходство результатов при анализе генотипической изменчивости разрывной нагрузки и ОРНр (r = 0,88 и 0,83 соответственно). Корреляцион-

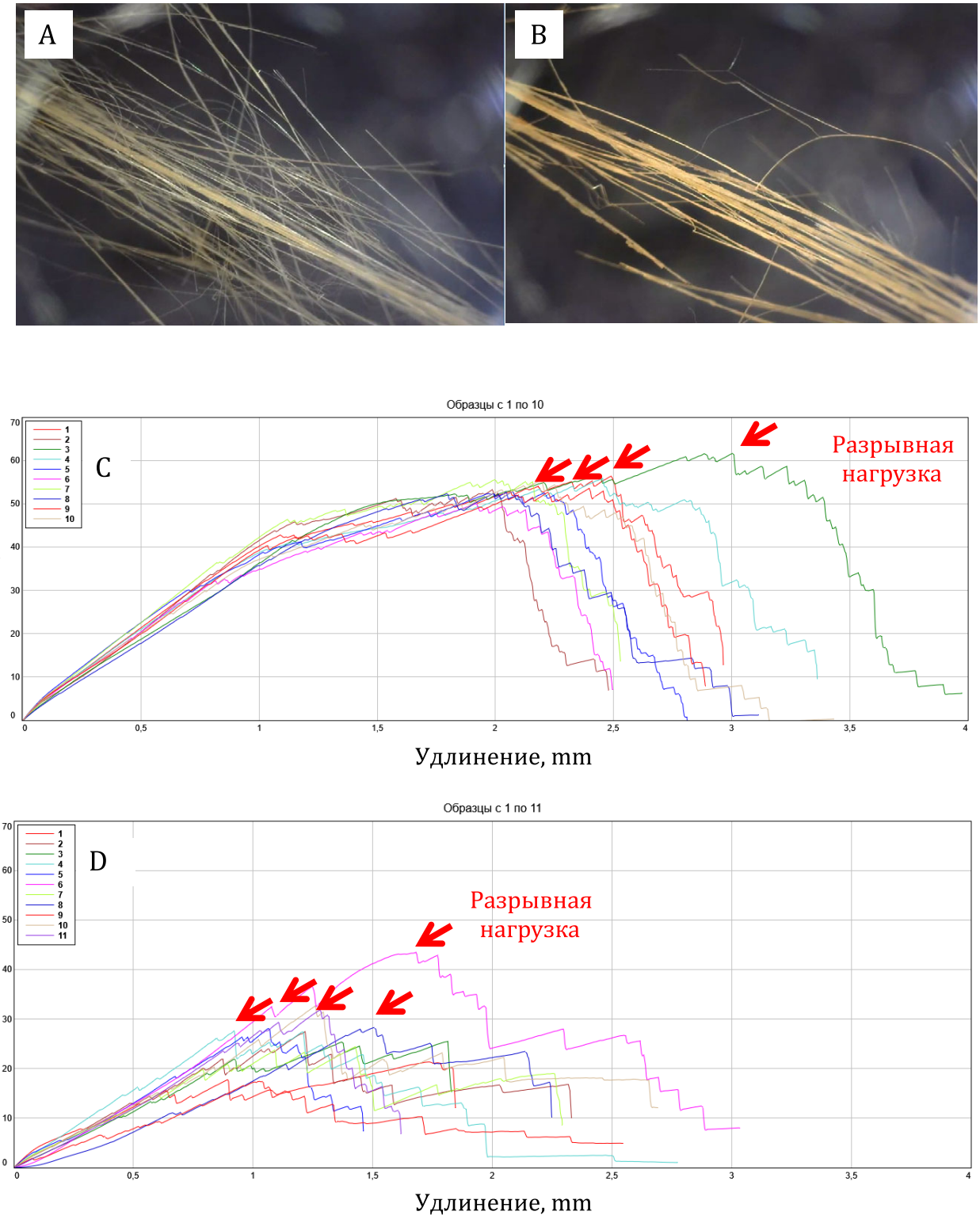


Рис. 1. Результат (A, B) и графическое изображение (C, D) испытаний двух образцов с хорошим и плохим качеством волокна на разрыв (**A**, **C** – к-8588, волокно хорошего качества; **B**, **D** – к-8595, волокно плохого качества)

Fig. 1. Results (A, B) and graphic images (C, D) of the fiber breaking tests on two samples with good and poor quality (**A**, **C** – k-8588, fiber of good quality; **B**, **D** – k-8595, fiber of poor quality)

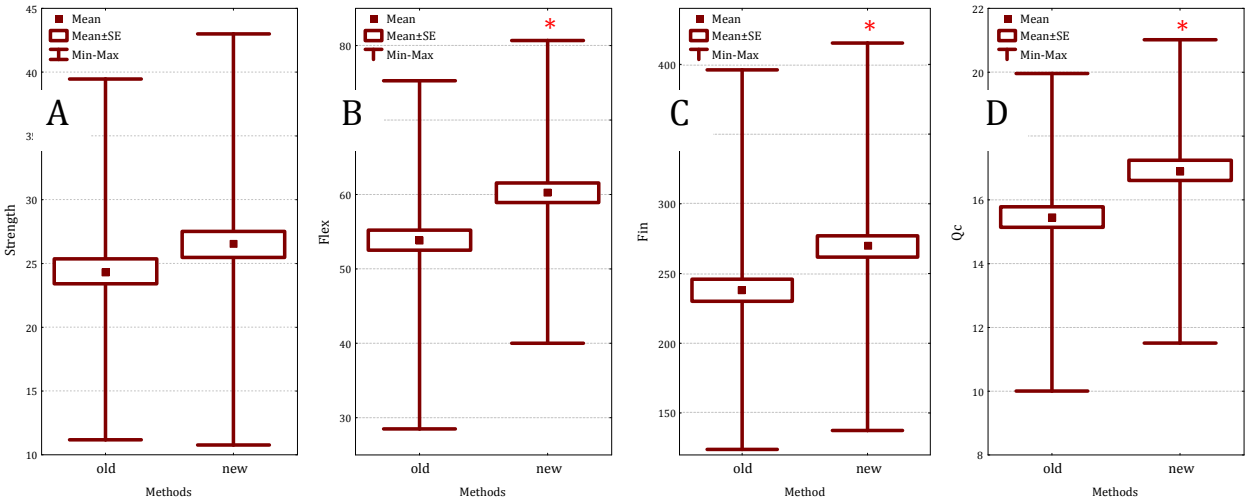


Рис. 2. Варьирование характеристик волокна у образцов льна, измеренных по старой (Old) и новой (New) методикам:
A – по разрывной нагрузке, даН; **B** – по гибкости, мм; **C** – по тонине, м/г; **D** – по ОРНр (* – различия достоверны; Min, Max, Mean, SE – минимальное, максимальное, среднее значение характеристик волокна, стандартная ошибка)

Fig. 2. Variability of fiber characters in flax accessions estimated with the conventional (Old) and proposed (New) techniques:
A – breaking load, daN; **B** – flexibility, mm; **C** –fineness, m/g; **D** – Qc, rated relative breaking load (* – significant differences; Min, Max, Mean, SE – minimum, maximum and mean values of fiber characters, and standard errors)

Таблица 3. Число различий рангов ранжирования образцов по показателям качества волокна, оцененных по стандартной и новой методикам

Table 3. Number of differences in the accessions' ranking according to the values of fiber quality characters estimated with the standard and new techniques

Различие между рангами значений, определенных стандартной и новой методиками / Difference between the ranks of values obtained with the standard and new techniques	Разрывная нагрузка / Breaking load	Гибкость / Flexibility	Тонина / Fineness	ОРНр / Rated relative breaking load
–3	0	2	0	1
–2	0	2	2	5
–1	23	12	8	9
0 (различий нет)	19	15	19	28
+1	8	16	14	7
+2	3	6	10	2
+3	0	0	0	1
[–1, +1]	50	43	41	44
[–3, –2] U [+2, +3]»	3	10	12	9
Сдвиг по рангам	новое завышено	новое симметрично	новое занижено	новое завышено
Различий нет (0), %	36	28	36	53
без различий, или различия в 1 ранг (+/–1), %	94	81	77	83
различия на 2–3 ранга (+/–2, +/–3),%	6	19	23	17

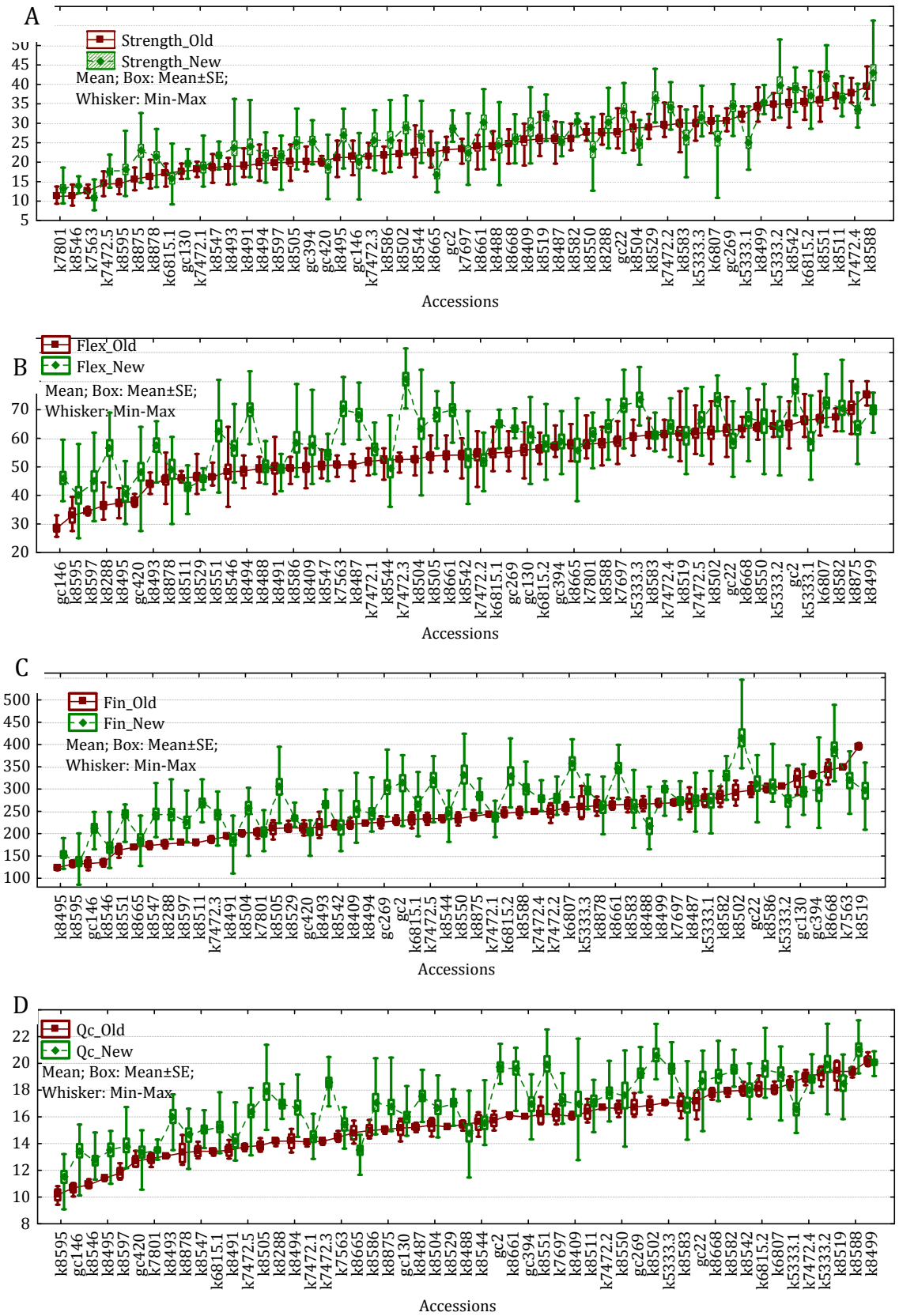


Рис. 3. Характеристики изменчивости параметров волокна образцов льна, измеренных по старой (Old) и новой (New) методикам: A – по разрывной нагрузке, даН; **B** – по гибкости, мм; **C** – по тонине, м/г; **D** – по QPHp (Accessions – образцы; Min, Max, Mean, SE – минимальное, максимальное, среднее значение характеристик волокна, стандартная ошибка)

Fig. 3. Variability characteristics in fiber parameters of flax accessions estimated with the conventional (Old) and proposed (New) techniques: A – breaking load, daN; **B** – flexibility, mm; **C** – fineness, m/g; **D** – Qc, rated relative breaking load-(Min, Max, Mean, SE – minimum, maximum and mean values of fiber characters, and standard errors)

Таблица 4. Сравнение показателей качества волокна образцов льна, проанализированных по стандартной и новой методикам

Table 4. Comparison of fiber quality parameters in flax accessions analyzed with the standard and new techniques

Показатель / Indicator	Характеристика методик / Techniques used				Критерий различий, p / Criterion of differences, *p*	
	Стандартная / Old		Новая / New		Mann–Whitney U test	Student's *t* test
	N	Mean ± Se	N	Mean ± Se		
Исходные данные						
Разрывная нагрузка	499	24,7 ± 0,3	532	26,5 ± 0,4	0,0020	0,0005
Гибкость	500	54,7 ± 0,4	532	60,2 ± 0,5	0,0000	0,0000
Тонина	159	238,0 ± 5,0	533	269 ± 3,0	0,0000	0,0000
ОРНр	159	15,5 ± 0,2	530	16,9 ± 0,1	0,0000	0,0000
Средние данные						
Разрывная нагрузка	53	24,4± 1,0	53	26,5 ± 1,0	0,17*	0,14*
Гибкость	53	53,9 ± 1,3	53	60,2 ± 1,3	0,0020	0,0011
Тонина	53	238,0 ± 8,0	53	269 ± 8,0	0,0032	0,0051
ОРНр	53	15,5 ± 0,3	53	16,9 ± 0,3	0,0021	0,0016

Примечание: [1] – N – число измерений в опыте; Mean ± Se – среднее с доверительным интервалом (± стандартная ошибка) варианта опыта; p – уровень значимости; [2] – различия не достоверны при p = 0,05

Note: [1] – N is the number of measurements in the experiment; Mean ± Se is the mean with a confidence interval (± standard error) for the experiment group; *p* is the significance level; [2] – the differences are not significant at *p* = 0.05

ный анализ гибкости и тонины, измеренных по этим двум методикам, показал меньшее сходство изменчивости (r = 0,67 и 0,69 для гибкости и тонины, соответственно) (рис. 4). С использованием регрессионного анализа возможно более точно перевести данные, полученные по новой методике, к стандартной. Но мы считаем, что в этом нет необходимости, так как выявленная флуктуация может отражать случайное варьирование внутри некоторых образцов.

Дисперсионный анализ признаков качества волокна по исходным и средним данным

Анализ исходных данных показал достоверное влияние генотипа, методики изучения и их взаимодействия на разрывную нагрузку, гибкость, тонину и ОРНр волокна. Около половины от общей изменчивости признаков качества волокна определяется генотипом образца, около трети – необъясненным фактором, что может указывать на неоднородность волокна, особенно по таким показателям как гибкость и тонина. Вклад методики изучения в изменчивость характеристик разрывной нагрузки (1%), гибкости (6%), тонины (5%) и ОРНр (7%) был незначительным, но достоверным. Взаимодействие генотипа и методики объясняет от 4 до 10% общей изменчивости признаков качества волокна и превышает вклад методики изучения (рис. 5).

Дисперсионный анализ средних данных показал достоверное влияние генотипа и методики изучения на показатели разрывной нагрузки, гибкости, тонины и ОРНр. Генотип объясняет более 3/4 от общей изменчивости характеристик качества – разрывной нагрузки (92%), гибкости (75%), тонины (78%) и ОРНр (83%). Вклад методики оценки обуславливал от 2% (разрывная нагрузка) до 7–10% (тонина, ОРНр и гибкость) общей изменчивости признаков качества волокна. Случайный (необъяснимый) фактор по таким показателям, как гибкость и тонина, составил 15 и 14% соответственно, а по разрывной нагрузке и ОРНр – 6 и 8% соответственно.

Таким образом, методика изучения незначительно (1–10%), но достоверно влияет на все показатели качества волокна. Здесь, как и при сравнении результатов с использованием t-критерия Стьюдента, негативную роль сыграл состав выборки образцов, в котором перекрывался весь вариационный ряд от минимальных до максимальных значений. Высокая точность методик оценки качества волокна привела к очень малой дисперсии признаков, что увеличило значимость даже небольших различий.

Заключение

Предложенная нами методика оценки качества волокна льна с использованием Instron 5943 максимально приближена к стандартной. Несмотря на трудозатратность, эта методика дает возможность получать первые результаты на более ранних этапах селекционного процесса, чем стандартная. Благодаря наличию в институте современной приборной базы, новая методика позволяет значительно уменьшить количество необходимого для анализа волокна и, следовательно, снизить количество семян, уменьшить площадь посева, сократить время на обработку почвы. Так, для стандартной методики, по которой мы изучаем поступающие в коллекцию образцы, необходимо высевать 2 тысячи семян на 1 м^2 (Kutuzova, Pitko, 1988). Для того чтобы получить такое количество семян от одного растения льна-долгунца требуется два-три года. Новая методика сокращает количество пересевов до одного-двух. Уменьшенная в 6,5 раза еди-

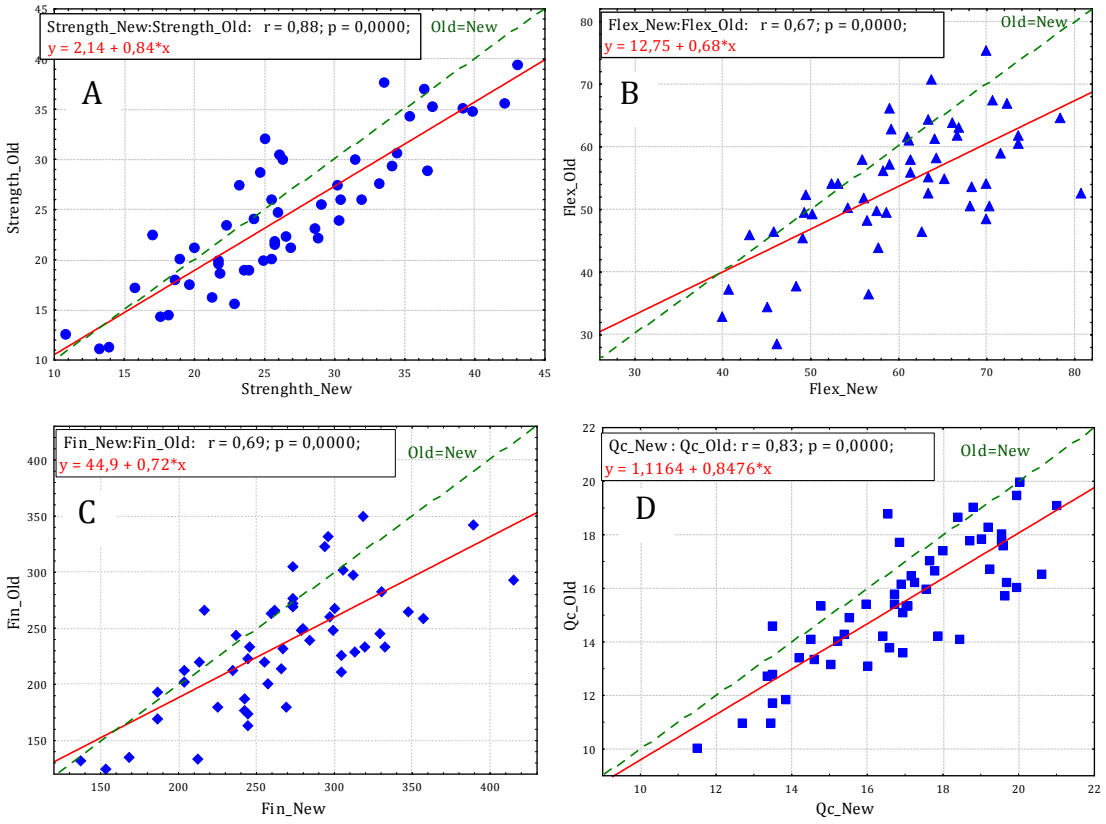


Рис. 4. Характеристики волокна образцов льна, измеренных по стандартной (Old) и новой (New) методикам: **A** – по разрывной нагрузке, даН; **B** – по гибкости, мм; **C** – по тонине, м/г; **D** – по ОРНр; r – коэффициент корреляции между новой и старой методиками; p – вероятность отсутствия корреляции; y = a + bx – уравнение регрессии для пересчета значений признаков, полученных по новой методике, к старой; New = Old – линия в случае равенства значений по новой и стандартной методикам

Fig. 4. Fiber characteristics in flax accessions estimated with the standard (Old) and proposed (New) techniques: **A** – breaking load, daN; **B** – flexibility, mm; **C** – fineness, m/g; **D** – Qc, rated relative breaking load; r is the correlation coefficient between the new and old techniques; *p* is the probability of no correlation; y = a + bx is the regression equation for recalculating the values obtained with the new technique to the old one; New = Old is a line if the values are equal for the new and standard techniques

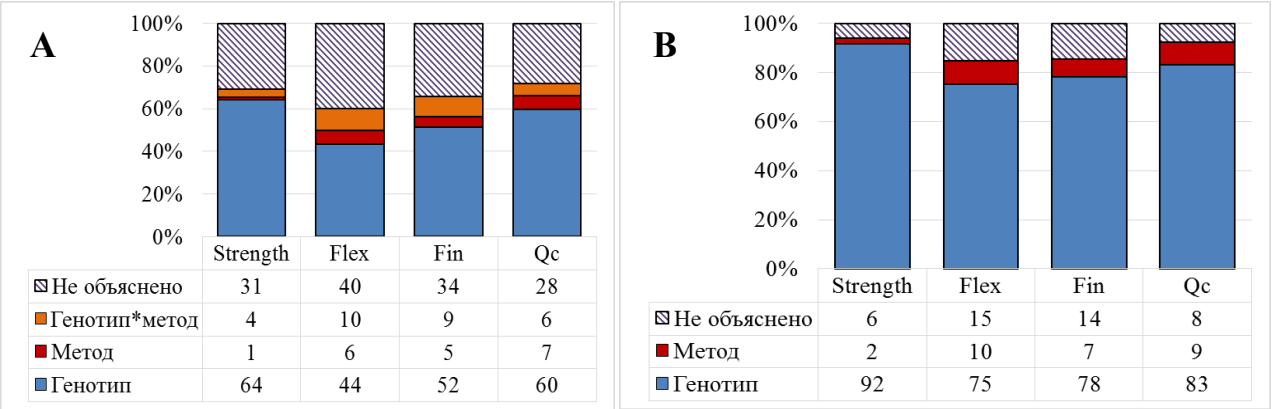


Рис. 5. Доля влияния генотипа и методики оценки на изменчивость признаков качества волокна по результатам дисперсионного анализа: **A** – доля влияния генотипа, методики изучения и их взаимодействия на разрывную нагрузку (Strength), гибкость (Flex), и тонину (Fin) по исходным данным; **B** – доля влияния генотипа и методики изучения на разрывную нагрузку (Strength), гибкость (Flex), тонину (Fin) и ОРНр (Qc) по средним данным

Fig. 5. The effect size of the genotype and estimation technique for the variability of fiber quality characters according to the results of variance analyses: **A** – the effect size of the genotype, technique, and their interaction for the breaking load (Strength), flexibility (Flex), fineness (Fin), and rated relative breaking load (Qc) according to the initial data; **B** – the effect size of the genotype, technique, and their interaction for the breaking load (Strength), flexibility (Flex), fineness (Fin), and rated relative breaking load (Qc) according to the mean data

ничная навеска волокна позволяет более точно устанавливать коэффициент варьирования признаков внутри образцов, что дает возможность отбирать наиболее однородные генотипы по разрывной нагрузке и гибкости. Изменения, внесенные нами в способ подготовки волокна для определения тонины, помогают точнее выявлять более однородные образцы по этому показателю.

References / Литература

Arno A.A., Grashchenko M.G., Shikov S.A. Methodology of technological evaluation for flax and hemp products (Metodika tekhnologicheskoy otsenki produktsii lna i konopli). Moscow: VASKhNIL; 1961. [in Russian] (Арно А.А., Гращенко М.Г., Шиков С.А. Методика технологической оценки продукции льна и конопли. Москва: ВАСХНИЛ; 1961).

Belopukhov S.L., Dmitrievskaya I.I., Grishina E.A., Kulemkin Yu.V., Bukina S.V. Estimation content of cellulose in the linen production by the method of near-infrared spectroscopy. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Textile Industry Technology*. 2017;4(370):115-118. [in Russian] (Белопухов С.Л., Дмитриевская И.И., Гришина Е.А., Кулемкин Ю.В., Букина С.В. Определение содержания целлюлозы в льнопродукции методом ближней инфракрасной спектроскопии. *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2017;4(370):115-118).

Bolshakova S.R., Pavlova L.N., Potrakhov N.N., Bessonov V.B. The use of the microfocal radiography at definition of the fibre content in individual stalks of long-stalked flax. *Agroindustrial Complex of Upper Volga Region Herald*. 2016;1(33):38-41. [in Russian] (Большакова С.Р., Павлова Л.Н., Потрахов Н.Н., Бессонов В.Б. Использование микрофокусной рентгенографии при определении содержания волокна в единичных стеблях льна-долгунца. *Вестник АПК Верхневолжья*. 2016; 1(33):38-41).

Duktova N.A., Tsyrkunova O.A., Andronik E.L., Porkhuntsova O.A., Mykhlyk A.I. The use of anatomic parameters of stalk in oilseed flax selection. *Bulletin of the Belarussian State Agricultural Academy*. 2014;(4):115-119. [in Russian] (Дуктова Н.А., Цыркунова О.А., Андроник Е.Л., Порхунцова О.А., Мыхлык А.И. Использование анатомических параметров стебля в селекции льна масличного. *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. 2014;(4):115-119).

Dyagilev A.S., Bizyuk A.N., Kogan A.G. Express estimation of the long scutched flax fiber spinning ability. In: *Topical Scientific Research Trends in the 21st Century: Theory and Practice* (*Aktualnye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktoka*). *No. 7, Part 1. Youth Forum: Technical and Mathematical Science. November 9-12, 2015, Voronezh.* Voronezh; 2015. p.350-354. [in Russian] (Дягилев А.С., Бизюк А.Н., Коган А.Г. Экспресс-оценка прядильной способности длинного трепаного льноволокна. В кн.: *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. № 7, часть 1. Молодежный форум: технические и математические науки. 9–12 ноября 2015 года, Воронеж*. Воронеж; 2015. С.350-354). DOI: 10.12737/14876

Fedosova N.M., Vikharev S.M., Bolonkin V.A. Improved method of estimation fiber flax on morphological grounds. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2012;(11):68-70. [in Russian] (Федосова Н.М., Вихарев С.М., Болонкин В.А. Совершенствование способа оценки льна-долгунца по морфологическим признакам. *Достижения науки и техники АПК*. 2012;(11):68-70).

GOST R 53484-2009. National standard of the Russian Federation. Scutched flax fibre. Specifications. Moscow: Standartinform; 2010. [in Russian] (ГОСТ Р 53484-2009. Национальный стандарт Российской Федерации. Лен трепаный. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2010). URL: https://docs.cntd.ru/document/1200076321 [accessed Nov. 26, 2024].

Ivanter E.V., Korosov A.V. Introduction to quantitative biology (Vvedeniye v kolichestvennuyu biologiyu). Petrozavodsk: Petrozavodsk University; 2003. [in Russian] (Ивантер Е.В., Коросов А.В. Введение в количественную биологию. Петрозаводск: Петрозаводский университет; 2003).

Khlopov A.A. Selection of the source material of fiber flax for fiber quality for breeding purposes (Otbor iskhodnogo materiala lna-dolguntsa na kachestvo volokna dlya tseley selektsii). In: *Scientific Support for Textile Crop Production: Status, Problems, and Prospects: Scientific Manual*. Tver: Tver State University; 2018. p.273-276. [in Russian] (Хлопов А.А. Отбор исходного материала льна-долгунца на качество волокна для целей селекции. В кн.: *Научное обеспечение производства прядильных культур: состояние, проблемы и перспективы: научное пособие*. Тверь: Тверской государственный университет; 2018. С.273-276).

Kutuzova S.N., Pitko G.G. (comp.). Studies of the flax (*Linum usitatissimum* L.) collection: guidelines (Izucheniye kollektsii lna (*Linum usitatissimum* L.): metodicheskiye ukazaniya). Leningrad: VIR; 1988. [in Russian] (Изучение коллекции льна (*Linum usitatissimum* L.): методические указания / сост. С.Н. Кутузова, Г.Г. Питько. Ленинград: ВИР; 1988).

Nasledov A.D. Mathematical methods of psychological research. Data analysis and interpretation (Matematicheskiye metody psikhologicheskogo issledovaniya. Analiz i interpretatsiya dannykh). St. Petersburg: Rech; 2012. [in Russian] (Наследов А.Д. Математические методы психологического исследования. Анализ и интерпретация данных. Санкт-Петербург: Речь; 2012).

Pashin E.L., Popova G.A. The direction of improving the assessment of fiber quality in the creation of new varieties of flax. *Agrarian Journal of Upper Volga Region*. 2024;1(46):5-13. [in Russian] (Пашин Е.Л., Попова Г.А. Направление совершенствования оценки качества волокна при создании новых сортов льна-долгунца. *Аграрный вестник Верхневолжья*. 2024;1(46):5-13). DOI: 10.35523/2307-5872-2024-46-1-5-13

Pashina L.V., Pashin E.L. Method of evaluating fiber flax fiber quality according to morphological characteristics. Russian Federation; patent number: 2369671 C1; 2009. [in Russian] (Пашина Л.В., Пашин Е.Л. Способ оценки качества волокна в стеблях льна-долгунца по морфологическим признакам. Российская Федерация; патент № 2369671 C1; 2009). URL: https://patenton.ru/patent/RU2369671C1.pdf [дата обращения: 02.12.2024].

Shimanskaya N.S., Uschapovsky I.V., Prokofiev S.V. Trends in the improvement of methods and equipment for the assessment of flax raw material (review). *Agricultural Science Euro-North-East*. 2020;21(6):639-652. [in Russian] (Шиманская Н.С., Ущаповский И.В., Прокофьев С.В.) Тенденции совершенствования методов и приборов для оценки качества льносырья (обзор). *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2020;21(6):639-652). DOI: 10.30766/2072-9081.2020.21.6.639-652

StatSoft. Electronic statistics textbook: [website]. Available from: http://statsoft.ru/home/textbook/default.html [accessed May 06, 2023].

Titok V.V., Leontiev V.N., Yurenkova S.I., Lugin V.G., Khotyleva L.V. New approaches in determining the quality of flax fiber. *Proceedings of the Belarusian State Technological University. Series 4: Chemistry and Organic Substances Technology*. 2006;1(4):127-130. [in Russian] (Титок В.В., Леонтьев В.Н., Юренкова С.И., Лугин В.Г., Хотылева Л.В. Новые подходы в определении качества льноволокна. *Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 4. Химия и технология органических веществ.* 2006;1(4):127-130).

Информация об авторах

Андрей Валерьевич Павлов, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, avpavlov77@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-5098-4904

Нина Борисовна Брач, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, n.brutch@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0003-2253-6263

Елизавета Александровна Пороховинова, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, e.porohovinova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8328-9684

Елена Константиновна Хлесткина, доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, директор, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, director@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-8470-8254

Information about the authors

Andrey V. Pavlov, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, Head of a Department, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, avpavlov77@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-5098-4904

Nina B. Brutch, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, n.brutch@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0003-2253-6263

Elizaveta A. Porokhovinova, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, e.porohovinova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8328-9684

Elena K. Khlestkina, Dr. Sci. (Biology), Corresponding Member of the RAS, Director, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, director@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-8470-8254

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 05.02.2025; одобрена после рецензирования 05.06.2025; принята к публикации 14.07.2025.
The article was submitted on 05.02.2025; approved after reviewing on 05.06.2025; accepted for publication on 14.07.2025.

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article
UDC 633.34:581.543(470.311)
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-127-139

CC BY

Interrelationships among morphological traits and seed yield in garden cress under two environmental circumstances

Naser Sabaghnia[1], Vahid Rahimi[2], Mehdi Mohebodini[2], Mohsen Janmohammadi[1]

[1] *University of Maragheh, Maragheh, Iran*

[2] *University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.*

Corresponding authors: Naser Sabaghnia, sabaghnia@maragheh.ac.ir; Mehdi Mohebodini, mohebodini@uma.ac.ir

Background. This study aimed to explore the morphological traits associated with seed yield in garden cress and to recognize the direct and indirect effects of agronomic characteristics. Analyzing the relationships between traits and seed yield with understanding their causal effects helps breeders choose the best combination of yield components to improve economic performance.
Materials and methods. A total of 64 accessions, including 60 international and 4 local Iranian genotypes, were evaluated across two locations (Ardabil and Eyvanki) using a randomized block scheme.
Results. Biomass consistently emerged as the most influential trait across both environments, followed by leaf- and pod-related characters. Categorizing traits into primary, secondary, tertiary, and quaternary orders helped reduce multicollinearity and clarified the structure of trait interrelationships. Path analysis indicated several optimal selection pathways, such as LB → PP → PB → BIO → SY in Ardabil, and FLO → LW → LL → SY in Eyvanki. The bootstrapped estimates confirmed the stability and reliability of the identified trait effects.
Conclusion. Finally, indirect selection based on biomass, leaf traits, and yield components can improve seed yield in garden cress. Also, simultaneous improvement of seed and leaf yield is feasible and should be considered in future breeding programs.

Keywords: correlations, multiple linear regression, indirect effects, selection, garden cress

Acknowledgements: the authors are sincerely grateful to the Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Germany, for providing garden cress accessions.
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Sabaghnia N., Rahimi V., Mohebodini M., Janmohammadi M. Interrelationships among morphological traits and seed yield in garden cress under two environmental circumstances. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(3):127-139. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-127-139

© Sabaghnia N., Rahimi V., Mohebodini M., Janmohammadi M., 2025

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-127-139

Взаимосвязь между морфологическими признаками и урожайностью семян кресс-салата в двух экологических условиях

Н. Сабагния[1], В. Рахими[2], М. Мохебодини[2], М. Джанмохаммади[1]

[1] *Университет Мараге, Мараге, Иран*

[2] *Университет Мохагег Ардабили, Ардебиль, Иран*

Авторы, ответственные за переписку: Насер Сабагния, sabaghnia@maragheh.ac.ir;
Мехди Мохебодини, mohebodini@uma.ac.ir

Актуальность. Целью настоящего исследования является анализ морфологических признаков, ассоциированных с урожайностью семян кресс-салата, а также определение их прямого и косвенного влияния на продуктивность растения. Понимание причинно-следственных связей между признаками и урожайностью способствует более обоснованному отбору селекционерами оптимальных комбинаций характеристик для повышения экономической эффективности культуры.
Материалы и методы. В исследовании оценено 64 генотипа кресс-салата, включая 60 зарубежных и 4 местных иранских образца. Опыт проводился в двух агроэкологических зонах, Ардебиль и Эйванки, с использованием рандомизированного блочного дизайна.
Результаты. Наиболее важным фактором, определяющим урожайность, в обеих средах стабильно выступала надземная биомасса. Второстепенное значение имели признаки, связанные с листьями и репродуктивными органами. Классификация признаков по уровням иерархии (первичные, вторичные, третичные и четвертичные) позволила снизить эффект мультиколлинеарности и более четко выявить структуру взаимосвязей. Анализ путей определил наиболее эффективные селекционные траектории, такие как LB → PP → PB → BIO → SY в условиях Ардебиля и FLO → LW → LL → SY в Эйванки. Результаты бутстреп-оценки подтвердили устойчивость и достоверность выявленных взаимосвязей.
Заключение. Косвенный отбор по таким признакам, как биомасса, морфология листа и компоненты урожайности, может эффективно способствовать увеличению семенной продуктивности кресс-салата. Более того, достижимо одновременное улучшение как семенной, так и листовой продуктивности, что следует учитывать в будущих программах селекции.

Ключевые слова: корреляции, множественная линейная регрессия, косвенные эффекты, селекция, кресс-салат

Благодарности: авторы выражают искреннюю благодарность Институту генетики растений и исследований сельскохозяйственных культур (Германия) за предоставление образцов кресс-салата, использованных в данном исследовании.
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Сабагния Н., Рахими В., Мохебодини М., Джанмохаммади М. Взаимосвязь между морфологическими признаками и урожайностью семян кресс-салата в двух экологических условиях. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(3):127-139. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-127-139

Introduction

As an annual vegetable crop and medicinal plant, garden cress (*Lepidium sativum* L.), is produced in different areas of the world for both food and medicinal purposes. It contains essential oils and edible fatty acids and has potential applications in bioenergy (Adera et al., 2022). In regions such as North Africa, Asia, and the UK, it is commonly consumed as a leafy vegetable. Breeding efforts for garden cress focus on improving seed yield, leaf yield, oil content, and tolerance to biotic and environmental stresses (Mohammed et al., 2025). However, the crop has relatively low production potential, which highlights the need to identify promising genotypes to achieve breeding goals. Seed yield is influenced by complex interactions between morphological and physiological traits, as well as environmental conditions. The improvement of traditional genotypes relies on the presence of genetic variation and genetic gain, in addition to understanding the relationships between yield and related traits (Nayebi-Aghbolag et al., 2019; Demeke et al., 2023). Given the available genetic diversity in the international garden cress accessions maintained by IPK (Institut für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung), Germany (Sabaghnia et al., 2015), there is strong potential for successful genetic improvement. Therefore, genetic evaluation of garden cress for traits such as seed yield, leaf yield, and quality is a key step in any breeding program.

Measuring correlations provides essential information about the contribution of different traits to a target trait such as seed yield (Saroj et al., 2021). This information is important in plant breeding, as it helps clarify the nature of associations among traits. Understanding these associations, especially between seed yield and its related components, and identifying their causal relationships, enables breeders to select the most beneficial traits for improving yield (Dwivedi et al., 2021). While correlation analysis offers insight into trait relationships, it does not reveal causality. Therefore, path analysis is needed to uncover both directly and indirectly impacts of yield components on yield performance. Unlike simple correlation, path analysis identifies the strength and direction of relationships between traits, offering a clear understanding of their roles (Yoo et al., 2025). This approach helps breeders determine the magnitude of each trait's influence on yield, making it a valuable tool in breeding programs (Cobb et al., 2019). By separating direct effects from indirect ones, path analysis improves interpretation and supports more accurate trait selection. As a result, it is widely used by breeders to identify key traits that significantly affect yield.

Bedassa et al. (2013) studied the associations among traits in 49 garden cress accessions and reported that seeds per plant, flowering time, biological yield, and thousand-seed weight had great positive impacts on yield performance. They suggested that selecting for these traits could improve yield performance in breeding programs. Similarly, Tadesse et al. (2018) examined 108 garden cress accessions and found that the harvest index and biomass had directly positive impacts on yield performance. Rahimi et al. (2019) evaluated 35 garden cress accessions and identified that thousand-seed weight, seeds per pod on the main and lateral axes, and leaf length had directly positive impacts on seed yield, while leaf width had a negative direct effect. These findings emphasize the importance of evaluating a wide range of accessions across different environments to gather reliable data. Thus, the objective of the current research was to analyze the interrelationships between yield performance and morphological traits in garden cress accessions using correlation and path analysis at two different experimental sites. This approach aimed to identify both direct and indirect influences of agronomic characteristics on yield and to apply this information for indirectly selecting in genetic improvement projects of garden cress.

Material and methods

To investigate the interrelationships among seed yield and agronomic traits, 60 international garden cress accessions (Table 1) were obtained from the IPK genebank. Additionally, four local Iranian accessions (Birjand, Tabriz, Kerman, and Shiraz) were included. All accessions were cultivated via a randomized block scheme with three replications at two locations. The first site, Ardabil (38°15'N, 48°17'E; 1351 m altitude), had 19 hours of daylight during their growth period, with a mean yearly temperature of 9°C and about 300 mm of rainfall. The second site, Eyvanki (35°20'N, 52°04'E; 1075 m altitude), with 18 hours of daylight during the growth period, has a warmer climate, with a mean yearly temperature of 20°C and approximately 112 mm of rainfall.

Each experimental plot consisted of five rows, 2 meters in length, spaced 15 cm apart, with a total area of 1.5 m^2. Seeds were sown densely and later thinned to maintain a uniform plant spacing of 15 cm. Irrigation and hand weeding were applied regularly at both locations. Fertilization followed local agricultural practices, with nitrogen applied in three stages at rates of 120, 60, and 30 kg ha^{-1}. Data were collected on the emergence percentage (EMR), emergence duration (ED), days to flowering (FLO), and flowering duration (FD), and recorded. Also, twelve agronomic traits were measured using ten random samples: first branch length (FBL), first pod length (FPL), height of the main stem (HMS), lateral branches (LB), pods per branch (PB), pods on the main stem (PMS), total pods per plant (PP), seeds in the branch pod (SBP), seeds in the main stem pod (SMSP), leaf length (LL), flower length (FL), and leaf width (LW). Finally, the aboveground biomass (BIO) was harvested from the three central rows of each plot, and both biomass and seed yield (SY) were measured in grams per square meter (g/m^2) and analyzed for further evaluation.

The normality of trait data was assessed using the Ryan–Joiner test in Minitab 17.0 (Minitab Inc., PA, USA). Pearson correlation coefficients among traits were computed using SPSS 27.0 (IBM Corp., IL, USA). To gain a deeper understanding of trait relationships and recognize those with the strongest impact on yield performance, path analysis was conducted. Firstly, multiple linear stepwise regression was performed with yield as the dependent and all other traits as independent. Path analysis was then applied to estimate the direct and indirect impacts of these traits on garden cress performance. Traits were classified into primary, secondary, tertiary, and quaternary orders based on repeated cycles of treating the identified key trait as the new target and using the remaining traits as predictors. To address multicollinearity, tolerance values and variance inflation factors (VIF) were calculated. All statistical analyses were carried out using SPSS and AMOS (IBM Corp., IL, USA). To ensure the robustness of results, bootstrapping with 1500 resamples was employed to estimate bias, standard deviations, and to compare bootstrap-derived statistics with conventional estimates.

Results and discussion

In Ardabil, seed yield showed a positive correlation with all measured traits of garden cress, except for emergence percentage (EMR), leaf width (LW) emergence duration (ED),

Table 1. **Name, variety and origin country of 64 garden cress accessions used in the study across Ardabil and Eyvanki locations**

Таблица 1. **Название, разновидность и страна происхождения 64 образцов кресс-салата, использованных в исследовании в районах Ардебиль и Эйванки**

Name	Varieties	Origin
LEP-1	*sativum*	Afghanistan
LEP-2	*latifolium*	Afghanistan
LEP-4	*sativum*	unknown
LEP-5	*crispum*	unknown
LEP-9	*sativum*	unknown
LEP-15	*crispum*	unknown
LEP-16	*latifolium*	Afghanistan
LEP-19	*crispum*	unknown
LEP-21	*latifolium*	Georgia
LEP-22	*latifolium*	Germany
LEP-23	*sativum*	Armenia
LEP-24	*latifolium*	Armenia
LEP-26	*latifolium*	Georgia
LEP-27	*latifolium*	Georgia
LEP-28	*latifolium*	Georgia
LEP-30	*latifolium*	Georgia
LEP-31	*latifolium*	Georgia
LEP-32	*latifolium*	Georgia
LEP-33	*sativum*	Libya
LEP-34	*latifolium*	Georgia
LEP-40	*sativum*	Iraq
LEP-42	*sativum*	Iraq
LEP-43	*latifolium*	Georgia
LEP-44	*sativum*	Georgia
LEP-45	*latifolium*	Georgia
LEP-46	*sativum*	Italy
LEP-47	*latifolium*	Ukraine
LEP-48	*sativum*	Georgia
LEP-49	*latifolium*	Georgia
LEP-51	*latifolium*	Georgia
LEP-53	*latifolium*	Georgia
LEP-57	*latifolium*	Georgia
LEP-60	*latifolium*	Georgia
LEP-62	*latifolium*	Georgia
LEP-64	*sativum*	Georgia
LEP-66	*sativum*	Germany
LEP-67	*sativum*	Germany
LEP-68	*sativum*	Germany
LEP-69	*sativum*	Germany
LEP-70	*sativum*	Germany
LEP-72	*sativum*	Germany
LEP-74	*sativum*	Yemen
LEP-76	*latifolium*	Germany
LEP-78	*sativum*	Germany
LEP-103	*sativum*	Austria
LEP-104	*sativum*	Belarus
LEP-106	*sativum*	Azerbaijan
LEP-107	*sativum*	Russia
LEP-108	*sativum*	Armenia
LEP-110	*sativum*	Russia
LEP-111	*sativum*	Georgia
LEP-114	*sativum*	unknown
LEP-115	*sativum*	unknown
LEP-116	*crispum*	unknown
LEP-117	*sativum*	unknown
LEP-118	*sativum*	unknown
LEP-119	*latifolium*	unknown
LEP-120	*latifolium*	USSR
LEP-126	*sativum*	USSR
Birjand	*sativum*	Iran
Kerman	*sativum*	Iran
Tabriz	*sativum*	Iran
Shiraz	*sativum*	Iran
LEP-73	*sativum*	Germany

days to flowering (FLO), flowering duration (FD), and leaf length (LL) (Table 2). In Eyvanki, seed yield was positively correlated with all traits except EMR, ED, FLO, FD, and first pod length (FPL). Aboveground biomass (BIO) in Ardabil had positive associations with FLO, LL, LW, SY, first branch length (FBL), height of the main stem (HMS), and seeds per pod on the main stem (SMSP). In Eyvanki, BIO was positively correlated with all traits except EMR, ED, FPL, lateral branches (LB), pods per branch (PB), and total pods per plant (PP). These results suggest that pod and seed-related traits are more closely linked to seed yield, while leaf characteristics are more associated with biomass production. Similar trends were reported by Sabaghnia et al. (2015) regarding the relation of seed yield with its main components. Therefore, the traits identified as significantly associated with seed yield may serve as important indicators for selection in breeding programs. To better understand the structure of these relationships and determine hidden impacts of yield components on yield performance, the path analysis was used, which provided a more comprehensive understanding of the complex interactions among traits, supporting more effective decision-making in garden cress breeding strategies.

A linear multiple regression model was applied to evaluate the significance of traits regarding yield, with multicollinearity indices also considered (Table 3). Traits were initially subjected as primary-order predictors of seed yield, and their direct effects were estimated through the regression model. Multicollinearities offered intuitions into the interdependencies among traits and their donations to yield variation. High multicollinearity was observed for leaf length (LL) and leaf width (LW) at both experimental sites, while most other traits did not exhibit significant multicollinearity (see Table 3). The adjusted R^2 values indicated that seeds per pod on branches (SBP), aboveground biomass (BIO), and leaf width (LW) were key primary-order traits explaining seed yield variation in Ardabil (Table 4).

In Eyvanki (Table 5), seeds per pod on the main stem (SMSP), BIO, leaf length (LL), and pods per branch (PB) emerged as the primary-order explanatory variables. These findings highlight the importance of seed-related traits, bio-

Table 2. Correlations among garden cress traits in Ardabil (above the diagonal) and Eyvanki (below the diagonal)

Таблица 2. Корреляции между признаками кресс-салата в Ардебиле (над диагональю) и Эйванки (под диагональю)

	EMR†	ED	FLO	FD	FBL	FPL	HMS	LB	PB	PMS	PP	SBP	SMSP	LL	LW	FL	SY	BIO
EMR		−0.29	−0.15	−0.08	0.09	0.03	0.15	0.02	−0.07	−0.29	−0.11	0.01	0.11	0.25	0.31	−0.08	0.02	0.21
ED	−0.19‡		0.19	−0.07	−0.22	−0.19	−0.21	−0.17	−0.10	0.03	−0.09	−0.01	−0.03	−0.10	−0.01	−0.06	−0.12	−0.12
FLO	0.06	0.01		0.25	0.10	−0.28	0.18	−0.57	−0.38	−0.11	−0.37	−0.30	−0.25	0.48	0.44	−0.09	−0.21	0.28
FD	−0.02	−0.06	0.35		−0.08	−0.23	0.00	−0.31	−0.30	0.06	−0.27	−0.31	−0.29	0.24	0.31	−0.14	−0.30	0.04
FBL	0.01	0.02	−0.03	0.02		0.60	0.77	0.41	0.48	0.21	0.47	0.34	0.36	0.11	0.04	0.49	0.44	0.44
FPL	−0.17	0.07	−0.17	−0.19	0.57		0.46	0.57	0.55	0.33	0.56	0.44	0.38	−0.14	−0.15	0.51	0.39	0.19
HMS	0.22	−0.03	0.17	0.09	0.51	0.16		0.17	0.23	0.24	0.25	0.15	0.14	0.30	0.21	0.45	0.29	0.52
LB	−0.01	0.04	−0.58	−0.36	0.34	0.46	−0.01		0.82	0.25	0.80	0.54	0.43	−0.46	−0.49	0.37	0.59	0.01
PB	0.14	0.05	−0.34	−0.14	0.45	0.34	0.29	0.77		0.39	0.99	0.63	0.55	−0.40	−0.49	0.52	0.68	0.08
PMS	0.24	0.08	0.40	0.33	0.40	0.17	0.61	0.02	0.39		0.52	0.19	0.31	0.01	−0.13	0.29	0.27	0.16
PP	0.17	0.06	−0.22	−0.06	0.49	0.34	0.39	0.69	0.98	0.56		0.61	0.56	−0.37	−0.47	0.52	0.67	0.10
SBP	−0.01	0.19	−0.14	0.01	0.41	0.31	0.40	0.43	0.61	0.43	0.63		0.72	−0.26	−0.32	0.48	0.72	0.22
SMSP	0.17	0.07	0.29	0.27	0.37	0.10	0.51	0.03	0.37	0.78	0.50	0.67		−0.07	−0.15	0.37	0.62	0.30
LL	0.14	0.12	0.61	0.35	0.28	−0.02	0.53	−0.48	−0.17	0.54	−0.04	−0.02	0.42		0.93	−0.18	−0.03	0.78
LW	0.13	0.18	0.49	0.39	0.27	−0.04	0.48	−0.44	−0.20	0.50	−0.07	−0.02	0.40	0.94		−0.24	−0.13	0.70
FL	0.05	0.13	0.03	−0.11	0.53	0.35	0.50	0.16	0.42	0.52	0.49	0.42	0.47	0.40	0.35		0.47	0.19
SY	0.10	0.19	0.13	0.09	0.41	0.12	0.58	0.30	0.58	0.63	0.65	0.70	0.75	0.36	0.30	0.51		0.56
BIO	0.08	0.17	0.46	0.33	0.44	0.08	0.67	−0.19	0.10	0.64	0.23	0.30	0.59	0.85	0.79	0.56	0.72	

Note: † – for the traits' abbreviations, refer to the text; ‡ – the highlighted values are significant and critical magnitudes of correlations at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ (with 62 degrees of freedom), 0.25 and 0.32, respectively

Примечание: † – сокращения признаков расшифрованы в тексте статьи; ‡ – выделенные значения обозначают достоверные и критические величины корреляций при $P < 0,05$ и $P < 0,01$(с 62 степенями свободы), 0,25 и 0,32 соответственно

Table 3. Regression coefficient (*b*), standard deviation (SD), path coefficient (*β*), *t*-statistic (*t*), significance level (Sig.), and two multicollinearity indices, tolerance (Tol.) and variance inflection factor (VIF), in Ardabil and Eyvanki

Таблица 3. Коэффициент регрессии (*b*), стандартное отклонение (SD), коэффициент пути (*β*), *t*-статистика (t), уровень значимости (Sig.) и два индекса мультиколлинеарности, толерантность (Tol.) и фактор перегиба дисперсии (VIF) в Ардебиле и Эйванки

	Ardabil						
	b	SD	*β*	*tt*	Sig.	Tol.	VIF
EMR	0.08	0.10	0.03	0.80	0.43	0.58	1.73
ED	−0.48	0.47	−0.04	−1.01	0.32	0.66	1.50
FLO	−0.03	0.24	−0.01	−0.13	0.90	0.42	2.36
FD	−0.75	0.97	−0.03	−0.77	0.45	0.67	1.50
FBL	−0.03	0.07	−0.03	−0.41	0.68	0.24	4.17
FPL	−0.15	0.12	−0.07	−1.32	0.19	0.39	2.57
HMS	−1.83	0.59	−0.18	−3.09	0.00	0.27	3.66
LB	0.01	0.57	0.00	0.03	0.98	0.19	5.23
PB	0.16	0.10	0.12	1.72	0.09	0.19	5.31
PMS	−0.06	0.33	−0.01	−0.17	0.86	0.53	1.88
PP	1.11	0.27	0.79	0.04	0.00	0.19	5.27
SBP	0.02	0.01	0.07	1.26	0.21	0.29	3.43
SMSP	0.01	0.04	0.02	0.31	0.76	0.37	2.72
LL	−4.11	0.89	−0.55	−4.62	0.00	0.07	14.51
LW	−8.20	1.96	−0.49	−4.19	0.00	0.07	13.80
FL	0.24	0.67	0.02	0.35	0.73	0.51	1.95
BIO	0.14	0.01	1.41	15.33	0.00	0.12	8.64

	Eyvanki						
	b	SD	*β*	*t*	Sig.	Tol.	VIF
EMR	−0.02	0.09	−0.01	−0.17	0.87	0.73	1.37
ED	0.29	0.37	0.03	0.79	0.44	0.72	1.39
FLO	0.19	0.32	0.04	0.61	0.55	0.32	3.09
FD	−1.99	0.84	−0.13	−2.36	0.02	0.46	2.16
FBL	−0.26	0.18	−0.08	−1.44	0.16	0.39	2.60
FPL	−0.68	0.37	−0.10	−1.87	0.07	0.47	2.12
HMS	−0.03	0.44	0.00	−0.06	0.95	0.30	3.32
LB	1.74	1.65	0.10	1.05	0.30	0.15	6.73
PB	1.96	1.91	0.95	1.03	0.31	0.72	1.38
PMS	0.95	2.28	0.11	0.42	0.68	0.39	2.62
PP	−1.39	1.92	−0.74	−0.72	0.47	0.43	2.36
SBP	0.05	0.03	0.10	1.42	0.16	0.25	4.03
SMSP	0.29	0.08	0.31	3.62	0.00	0.18	5.60
LL	−2.64	1.53	−0.31	−1.72	0.09	0.04	25.00
LW	−2.04	2.08	−0.13	−0.98	0.33	0.07	13.85
FL	−2.73	1.28	−0.13	−2.14	0.04	0.37	2.71
BIO	0.09	0.01	1.03	9.34	0.00	0.11	9.33

Table 4. Direct effects (β) and coefficient of determination (R^2) of path analysis for target (Y) and independent traits (X), with *t*-statistic (*t*), significance level (Sig.), and two multicollinearity indices, tolerance (Tol.) and variance inflection factor (VIF), in Ardabil

Таблица 4. Прямые эффекты (β) и коэффициент детерминации (R^2) анализа пути для целевых (Y) и независимых признаков (X) с *t*-статистикой (*t*), уровнем значимости (Sig.) и двумя индексами мультиколлинеарности, толерантностью (Tol.) и фактором перегиба дисперсии (VIF) в Ардебиле

Y	X	R^2	β	*t*	Sig.	Tol.	VIF
SY	SBP	0.88	0.22	3.56	0.00	0.51	1.96
	BIO		1.09	13.49	0.00	0.29	3.42
	LW		−0.82	−9.88	0.00	0.27	3.64
SBP	SMSP	0.58	0.53	5.42	0.00	0.70	1.44
	PB		0.34	3.44	0.00	0.70	1.44
BIO	LL	0.78	0.96	14.72	0.00	0.84	1.19
	PB		0.46	7.11	0.00	0.84	1.19
LW	LL	0.85	0.93	19.22	0.00	1.00	1.00
SMSP	PP	0.30	0.56	5.31	0.00	1.00	1.00
PB	PP	0.97	0.99	52.44	0.00	1.00	1.00
LL	FLO	0.31	0.53	4.98	0.00	0.98	1.02
	EMR		0.33	3.10	0.00	0.98	1.02
PP	LB	0.75	0.72	11.04	0.00	0.94	1.06
	PMS		0.35	5.31	0.00	0.94	1.06
FLO	LB	0.44	−0.73	−7.04	0.00	0.83	1.20
	FBL		0.40	3.81	0.00	0.83	1.20
EMR	PMS	0.13	−0.28	−2.42	0.02	1.00	1.00
	ED		−0.28	−2.36	0.02	1.00	1.00

mass, and leaf size as the most influential factors affecting seed yield across both locations.

In Ardabil, aboveground biomass (BIO) indicated the greatest direct impact on seed yield (1.09), followed by a smaller positive effect from seeds per pod on branches (SBP) (0.22) and a strong negative direct effect from leaf width (LW) (–0.82) (Table 6). The indirect effects of SBP through BIO and LW were relatively low (0.24 and 0.27, respectively). Conversely, the indirect effect of BIO through SBP was minimal (0.05), and its indirect effect through LW was moderate and negative (–0.57). The indirect impact of LW via SBP was low (–0.07), while its indirect impact via BIO was notably high and positive (0.76) (see Table 6). To visually represent these relationships, a path diagram was created using AMOS (Figure). In Eyvanki, BIO again indicated the strongest direct impact on yield (1.02) compared to other traits, such as seeds per pod on the main stem (SMSP), leaf length (LL), and pods per branch (PB) (see Table 5). Notable indirect effects were observed, including SMSP through BIO (0.60), BIO through LL (–0.51), and LL through BIO (0.87) (Table 6). These interactions were also illustrated using a path diagram, generated with the default model in AMOS (IBM-SPSS 24.0, IBM Corp., IL, USA). Model fit was confirmed by several fit indices (results not shown), all indicating acceptable model performance. These findings align with those of Tadesse et al. (2018), who also reported a strong positive direct effect of biomass on seed yield across diverse Ethiopian garden cress accessions. However, unlike other studies where thousand-seed weight was identified as a key trait, it was not found to be influential in the current study.

When the primary-order traits were analyzed as target variables in Ardabil, it was found that seeds per pod on the main stem (SMSP) and pods per branch (PB) had positive effects on seeds per pod on branches (SBP), explaining over 58% of its variability (see Table 4). Leaf length (LL) and PB also showed positive influences on aboveground biomass (BIO), accounting for more than 78% of its variability.

Additionally, LL had a positive effect on leaf width (LW) in Ardabil. In terms of direct and indirect effects, SMSP had a stronger direct effect on SBP (0.53) compared to PB, which had a lower indirect effect through PB (0.19). Conversely, PB showed a moderate positive indirect effect through SMSP (0.29) (see Table 6). LW exhibited a higher direct effect (0.96) than PB, while its indirect impacts via PB were slightly negative (–0.19), and PB's indirect effect via SMSP on LW was moderately negative (–0.38). In Eyvanki, when SMSP, BIO, LL, and PB were considered primary-order target traits, it was observed that pods on the main stem (PMS) and SBP had positive effects on SMSP, explaining more than 74% of its variability (see Table 5).

Similarly, LW and height of the main stem (HMS) positively influenced BIO and explained over 73% of its variation.

Table 5. **Direct effects (*β*) and coefficient of determination (R^2) of path analysis for target (Y) and independent traits (X), with *t*-statistic (*t*), significance level (Sig.), and two multicollinearity indices, tolerance (Tol.) and variance inflection factor (VIF), in Eyvanki**

Таблица 5. **Прямые эффекты (*β*) и коэффициент детерминации (R^2) анализа пути для целевых (Y) и независимых признаков (X) с *t*-статистикой (*t*), уровнем значимости (Sig.) и двумя индексами мультиколлинеарности, толерантностью (Tol.) и фактором перегиба дисперсии (VIF), в Эйванки**

X	Y	R^2	*β*	*t*	Sig.	Tol.	VIF
SY	SMSP	0.89	0.30	5.15	0.00	0.55	1.80
	BIO		1.02	10.21	0.00	0.18	5.42
	LL		−0.59	−6.19	0.00	0.20	4.96
	PB		0.26	4.90	0.00	0.65	1.54
SMSP	PMS	0.74	0.61	8.59	0.00	0.82	1.23
	SBP		0.41	5.72	0.00	0.82	1.23
BIO	LW	0.73	0.61	8.21	0.00	0.77	1.30
	HMS		0.38	5.17	0.00	0.77	1.30
LL	LW	0.89	0.94	22.13	0.00	1.00	1.00
PB	PP	0.96	0.98	37.29	0.00	1.00	1.00
PMS	FL	0.54	0.49	5.58	0.00	0.95	1.06
	FD		0.35	3.68	0.00	0.83	1.20
	FLO		0.46	4.25	0.00	0.63	1.60
	LB		0.34	3.08	0.00	0.61	1.63
SBP	LB	0.29	0.38	3.53	0.00	0.98	1.03
	FL		0.36	3.31	0.00	0.98	1.03
HMS	FBL	0.31	0.35	2.82	0.01	0.72	1.39
	FL		0.31	2.54	0.01	0.72	1.39
LW	FLO	0.45	0.22	1.88	0.06	0.63	1.60
	FL		0.41	4.28	0.00	0.95	1.06
	FD		0.26	2.51	0.01	0.83	1.20
	LB		−0.28	−2.33	0.02	0.61	1.63
PP	LB	0.66	0.72	9.09	0.00	0.85	1.17
	FL		0.40	5.38	0.00	0.97	1.03
	FD		0.25	3.15	0.00	0.87	1.15
FL	FPL	0.11	0.35	2.91	0.00	1.00	1.00
LB	FPL	0.20	0.46	4.05	0.00	1.00	1.00
FBL	FPL	0.31	0.57	5.43	0.00	1.00	1.00

PMS had a stronger direct effect on SMSP (0.61) compared to SBP, which had a low indirect effect via PMS (0.17). SBP's indirect effect through PMS was also low but positive (0.26) (see Table 6). In the case of LW, its direct effect (0.61) was higher than that of HMS, with a small indirect effect through HMS (0.18). These results are consistent with findings from Mohebodini et al. (2018), who also reported the positive impact of the seeds per pod and pods per plant on garden cress yield through path analysis.

To identify tertiary-order traits, the secondary-order traits were treated as targets. In Ardabil, total pods per plant (PP) affected seeds per pod on the main stem (SMSP) and pods per branch (PB), explaining approximately 30% and 97% of the variation, respectively. Additionally, days to flowering (FLO) and emergence percentage (EMR) positively affected leaf length (LL), accounting for about 31% of its variability (see Table 4). The indirect effects of FLO and EMR via each other were minimal (see Table 5). In Eyvanki, the terti-

Table 6. **Indirect effects of path analysis shown beyond the diagonals in Ardabil and Eyvanki**

Таблица 6. **Косвенный эффект анализа пути, показанный за пределами диагоналей в Ардебиле и Эйванки**

Ardabil				Eyvanki				
	SBP	**BIO**	**LW**		**SMSP**	**BIO**	**LL**	**PB**
SBP	**0.22**	0.24	0.27	SMSP	**0.30**	0.60	−0.25	0.10
BIO	0.05	**1.09**	−0.57	BIO	0.17	**1.02**	−0.51	0.03
LW	−0.07	0.76	**−0.82**	LL	0.12	0.87	**−0.59**	−0.05
	SMSP	**PB**		PB	0.11	0.11	0.10	**0.26**
SMSP	**0.53**	0.19			**FL**	**FD**	**FLO**	**LB**
PB	0.29	**0.34**		FL	**0.49**	−0.04	0.02	0.05
	LL	**PB**		FD	−0.05	**0.35**	0.16	−0.12
LL	**0.96**	−0.19		FLO	0.02	0.12	**0.46**	−0.19
PB	−0.38	**0.46**		LB	0.08	−0.13	−0.27	**0.34**
	FLO	**EMR**			**FLO**	**FL**	**FD**	**LB**
FLO	**0.53**	−0.05		FLO	**0.22**	0.01	0.09	0.16
EMR	−0.08	**0.33**		FL	0.01	**0.41**	−0.03	−0.04
	LB	**PMS**		FD	0.08	−0.04	**0.26**	0.10
LB	**0.72**	0.09		LB	−0.13	0.06	−0.09	**−0.28**
PMS	0.18	**0.35**			**LB**	**FL**	**FD**	
	LB	**FBL**		LB	**0.72**	0.06	−0.09	
LB	**−0.73**	0.16		FL	0.11	**0.40**	−0.03	
FBL	−0.30	**0.40**		FD	−0.26	−0.04	**0.25**	
	PMS	**ED**			**PMS**	**SBP**		
PMS	**−0.28**	−0.01		PMS	**0.61**	0.17		
ED	−0.01	**−0.28**		SBP	0.26	**0.41**		
					LW	**HMS**		
				LW	**0.61**	0.18		
				HMS	0.29	**0.38**		
					LB	**FL**		
				LB	**0.38**	0.06		
				FL	0.06	**0.36**		
					FBL	**FL**		
				FBL	**0.35**	0.17		
				FL	0.18	**0.31**		

Note: the boldfaced values (diagonals) denote direct effects, while indirect effects are shown on both sides of the diagonals

Примечание: значения прямого эффекта выделены жирным шрифтом (по диагонали); косвенный эффект представлен по обеим сторонам диагоналей

ary-order traits included flower length (FL), flowering duration (FD), days to flowering (FLO), and lateral branches (LB), which influenced pods on the main stem (PMS) and leaf width (LW), explaining approximately 54% and 45% of the variation, respectively (see Table 5). LB and FL had moderate positive effects on seeds per pod on branches (SBP), while first branch length (FBL) and FL showed moderate positive effects on the height of the main stem (HMS). Furthermore, LB, FL,

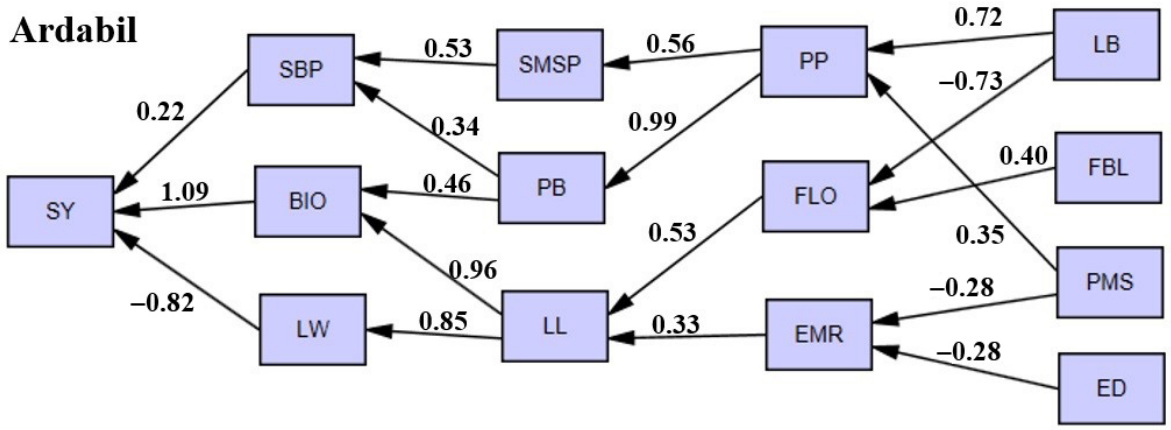


Figure. **Path diagram of garden cress traits showing the direct effects in Ardabil**

Рисунок. **Диаграмма путей изменения характеристик кресс-салата, показывающая прямое влияние в Ардебиле**

and FD showed positive influences on total pods per plant (PP). Although, FL, FD, FLO, and LB had moderate direct effects on PMS, their indirect effects via one another were low (see Table 6). Similarly, their indirect contributions to LW were also limited. LB and FL each showed moderate direct effects on SBP, with minimal indirect effects through one another (see Table 6). FBL and FL demonstrated moderate direct effects on HMS, but again with low indirect effects through each other. In particular, LB had a stronger direct effect on PP (0.72) compared to FL and FD, with low indirect effects via these traits. FL also had a moderate direct effect (0.40), with minor indirect effects through LB and FD (see Table 6). FD showed a moderate direct effect on PP, but its indirect effect through itself was moderately negative (–0.26), and its indirect effect via FL was low. These findings partially correspond with those of Bedassa et al. (2013), who found that biomass, maturation time, and seeds per pod had large direct effects on seed yield in their study of 49 Ethiopian garden cress accessions.

To identify quaternary-order traits, the tertiary-order traits were analyzed as targets. In Ardabil, lateral branches (LB) and pods on the main stem (PMS) influenced total pods per plant (PP), explaining approximately 75% of its variation. Additionally, LB and first branch length (FBL) significantly impacted days to flowering (FLO), accounting for 44% of the variation (see Table 4). PMS and emergence duration (ED) had a negative effect on emergence percentage (EMR), collectively explaining about 13% of its variation. The indirect effects among LB and PMS, LB and FBL, and PMS and ED were minimal (see Table 6).

In Eyvanki, the quaternary-order trait identified was first pod length (FPL), which influenced flower length (FL), LB, and FBL, explaining about 11%, 20%, and 31% of the variation, respectively (see Table 5). FPL exhibited moderate positive effects on FL (0.35), LB (0.46), and FBL (0.57). Based on the results from both locations, the following traits: BIO, FBL, FLO, LB, LL, LW, PB, PMS, PP, SBP, and SMSP, were identified as influential across primary to quaternary orders in determining seed yield of garden cress. In Ardabil, the most effective pathways for increasing seed yield were: LB → PP → PB → BIO → SY, followed by LB → FLO → LL → LW → SY, and FBL → FLO → LL → BIO → SY according to the Figure. In Eyvanki, the most efficient paths were: FLO → LW → LL → SY, followed by FPL → FL → LW → BIO → SY, FPL → LB → PP → PB → SY, and FLO → FL → PMS → SMSP → SY.

These variations in trait interrelationships across the two environments highlight the influence of environmental conditions, while the observed similarities suggest a genetic basis rooted in the nature of the studied accessions. Overall, traits such as leaf length (LL), days to flowering (FLO), leaf width (LW), lateral branches (LB), pods per branch (PB), aboveground biomass (BIO), and total pods per plant (PP) emerged as the most important and reliable indicators of seed yield. Emphasizing biomass and leaf traits can thus be considered an effective strategy for garden cress breeding programs aimed at yield improvement.

Plant breeders commonly use both point and interval estimators to ensure the reliability of extracted statistics. Resampling methods such as bootstrapping are especially useful in this regard, as they provide robust estimators characterized by minimal bias and low standard errors for direct effects. In the present study, the use of 1500 bootstrap resamples (Table 7) yielded very small standard errors and minimal bias, confirming the statistical robustness and reliability of the results. Furthermore, the application of path analysis reduced multicollinearity, particularly in the presence of highly correlated variables. This was made possible by employing stepwise linear multiple regression, which helped mitigate the negative impact of multicollinearity on the analysis. This approach is essential because it ensures that predictor variables remain independent at each stage of analysis. The categorization of measured characteristics into primary, secondary, tertiary, and quaternary orders was effective in resolving multicollinearity issues. This methodological framework was successfully applied in previous studies, including those by Janmohammadi et al. (2014) on wheat, Zavoshti et al. (2023) on common sainfoin, and Sabaghnia and Janmohammadi (2024) on chickpea. Overall, this analytical model offers a detailed grasping of relationships among traits and increases the reliable properties of findings in plant breeding research.

The presence of correlations between seed yield and morphological traits is valuable for identifying factors that can be utilized in the indirect selection process to pinpoint high-yielding genotypes. Achieving higher seed yield remains a central goal in genetic improvement programs. However, yield is a complicated quantitative characteristic affected by multiple factors, both positively and negatively. Due to its low heritability, direct selection for yield is unsuccessful; therefore, indirect selection via associated characteristics is preferred. In this study, seed yield in garden cress showed signifi-

Table 7. **Bootstrapping for path analysis for target and independent traits in Ardabil and Eyvanki**

Таблица 7. **Бутстреп-оценка для анализа пути для целевых и независимых признаков в Ардебиле и Эйванки**

Ardabil					Eyvanki				
Y	**X**	**Mean**	**Bias**	**SD**	**Y**	**X**	**Mean**	**Bias**	**SD**
SY	SBP	0.218	0.065	0.140	SY	SMSP	0.297	−0.006	0.077
	BIO	1.092	−0.027	0.091		BIO	1.019	−0.006	0.102
	LW	−0.824	0.029	0.093		LL	−0.592	0.011	0.084
SBP	SMSP	0.531	−0.027	0.209		PB	0.261	0.005	0.045
	PB	0.337	0.010	0.066	SMSP	PMS	0.610	−0.014	0.075
BIO	LL	0.961	0.003	0.058		SBP	0.406	0.023	0.120
	PB	0.464	0.001	0.063	BIO	LW	0.609	−0.001	0.078
LW	LL	0.925	0.000	0.052		HMS	0.384	0.001	0.076
SMSP	PP	0.559	0.004	0.116	LL	LW	0.942	0.000	0.048
PB	PP	0.989	0.001	0.019	PB	PP	0.978	−0.001	0.026
LL	FLO	0.526	0.021	0.113	PMS	FL	0.492	0.005	0.123
	EMR	0.328	0.001	0.102		FD	0.346	0.004	0.089
PP	LB	0.718	−0.001	0.064		FLO	0.460	−0.009	0.126
	PMS	0.346	0.006	0.072		LB	0.337	0.001	0.107
FLO	LB	−0.730	−0.002	0.121	SBP	LB	0.379	0.006	0.084
	FBL	0.396	−0.008	0.102		FL	0.356	0.007	0.102
EMR	PMS	−0.283	0.008	0.133	HMS	FBL	0.348	−0.010	0.115
	ED	−0.276	−0.014	0.156		FL	0.313	0.016	0.139
					LW	FLO	0.224	−0.020	0.140
						FL	0.414	−0.001	0.129
						FD	0.259	0.031	0.151
						LB	−0.280	0.000	0.108
					PP	LB	0.720	-0.003	0.086
						FL	0.399	0.003	0.068
						FD	0.248	-0.007	0.081
					FL	FPL	0.347	0.006	0.109
					LB	FPL	0.458	0.005	0.130
					FBL	FPL	0.568	0.009	0.119

cant positive associations with key yield components common to Brassicaceae species; such as number of seeds and pods, aboveground biomass, and leaf traits; indicating the potential for simultaneous breeding for both seed and leaf yield. Current results align with the results of Rahimi et al. (2019), who found a positive association between leaf characteristics and seed yield. Similarly, Sabaghnia et al. (2016) detected a positive relationship between leaf and seed yield in spinach and recommended the concurrent selection for these traits in leafy vegetables. Traits associated with seed yield may be considered predictive variables in Brassicaceae crops, such as garden cress. The significant direct and indirect relationships observed in this study for leaf length, days to flowering, lateral branches, leaf width, pods per branch, aboveground biomass, and total pods per plant suggest that these traits are not only positively related to yield but also genetically heritable (Kakaei, Farshadfar, 2025). Therefore, their selection is likely to improve both seed and leaf yield. In particular, the positive association between days to flowering and seed yield suggests that late-maturing accessions may accumulate more biomass, which in turn enhances seed yield. Thus, selection for days to flowering can indirectly support breeding for higher seed yield. The overall pattern of direct and indirect impacts confirmed via path analysis highlights these traits as key selection criteria in breeding programs. Even a modest increase in any of these traits may lead to significant yield im-

provement, making them essential components in strategies aimed at genetic enhancement of garden cress performance.

The findings revealed that yield is significantly associated with several other plant characteristics, many of which demonstrated both direct and indirect effects. One of the most consistent and influential traits across both environments was aboveground biomass, which showed the largest direct effect on yield. This highlights biomass as a critical trait, not only in terms of its physiological role but also as a reliable indicator for yield selection. Tao et al. (2024) indicated that when more biomass was invested in shoots of Brassicaceae family, like rapeseed, the seed yield would decrease. In both locations, biomass contributed substantially to yield performance either directly or through intermediate traits, such as pods per plant or leaf width. This suggests that enhancing vegetative growth may inherently support reproductive yield in garden cress, aligning with previous findings in related species, like maize (Adak et al., 2021), cotton (Chalise et al., 2022), and some vegetable crops (Chaudhary et al., 2022). Another key finding was the significance of leaf morphological traits, particularly leaf dimensions (length and width). Although, these traits are typically associated with vegetative performance, their moderate to strong correlations and path coefficients with seed yield indicate a dual role in plant productivity. This dual contribution supports the idea of simultaneous selection for leaf and seed yield, which could be especially advantageous in leafy vegetables, like garden cress where both traits are economically valuable. Pods per plant and their seeds (both on the branch and main stem) also emerged as strong contributors to seed yield. These reproductive traits directly affect seed output and are commonly targeted in breeding programs. Their consistent presence as significant predictors across both primary and secondary trait orders underscores their importance in yield improvement strategies. Moreover, traits like lateral branches and days to flowering were found to influence these pod- and seed-related traits, forming effective indirect selection paths. For instance, the best predictive paths included such sequences as LB → PP → PB → BIO → SY in Ardabil, and FLO → LW → LL → SY in Eyvanki. Environmental differences also played a role in shaping trait interrelationships, while the same traits were influential in both sites, the strength and order of their effects varied, reflecting environmental modulation of genotype performance. Nonetheless, the consistency of key traits across locations emphasizes their genetic stability and utility in breeding (Wang et al., 2024). Importantly, the stepwise regression model and trait categorization (into primary, secondary, tertiary, and quaternary orders) helped reduce multicollinearity and clarified complex trait interactions. The use of bootstrapping further validated the robustness of the path coefficients and regression outcomes, ensuring the reliability of the finding.

Conclusion

This study highlighted the importance of biomass, leaf traits, days to flowering, and yield components as key factors of seed yield in garden cress. The path analysis revealed both direct and indirect relationships among traits across both locations. These findings support the use of indirect selection strategies in breeding programs, enabling simultaneous improvement of seed and leaf yield under diverse environmental conditions. Breeders should prioritize indirect selection for biomass, leaf traits, and reproductive components, particularly pods and seeds per plant, to enhance both seed yield and overall productivity in garden cress.

References / Литература

Adak A., Murray S.C., Božinović S., Lindsey R., Nakasagga S., Chatterjee S. et al. Temporal vegetation indices and plant height from remotely sensed imagery can predict grain yield and flowering time breeding value in maize via machine learning regression. *Remote Sensing*. 2021;13(11):2141. DOI: 10.3390/rs13112141

Adera F., Yusuf Z., Desta M. Physicochemical properties and biological activities of garden cress (*Lepidium sativum* L.) seed and leaf oil extracts. *Canadian Journal of Infectious Diseases and Medical Microbiology*. 2022;1:2947836. DOI: 10.1155/2022/2947836

Bedassa T., Andargie M., Eshete M. Genetic variability and association among yield, yield related traits and oil content in Ethiopian garden cress (*Lepidium sativum* L.) genotypes. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*. 2013;7(5):141-149. DOI: 10.5897/JPBCS2013.0396

Chalise D.P., Snider J.L., Hand L.C., Roberts P., Vellidis G., Ermanis A. et al. Cultivar, irrigation management, and mepiquat chloride strategy: Effects on cotton growth, maturity, yield, and fiber quality. *Field Crops Research*. 2022;286:108633. DOI: 10.1016/j.fcr.2022.108633

Chaudhary S., Devi P., HanumanthaRao B., Jha U.C., Sharma K.D., Prasad P.V.V. et al. Physiological and molecular approaches for developing thermotolerance in vegetable crops: A growth, yield and sustenance perspective. *Frontiers in Plant Science*. 2022;13:878498. DOI: 10.3389/fpls.2022.878498

Cobb J.N., Juma R.U., Biswas P.S., Arbelaez J.D., Rutkoski J., Atlin G. et al. Enhancing the rate of genetic gain in public-sector plant breeding programs: lessons from the breeder's equation. *Theoretical and Applied Genetics*. 2019;132(3):627-645. DOI: 10.1007/s00122-019-03317-0

Demeke B., Dejene T., Abebe D. Genetic variability, heritability, and genetic advance of morphological, yield related and quality traits in upland rice (*Oryza sativa* L.) genotypes at pawe, northwestern Ethiopia. *Cogent Food and Agriculture*. 2023;9(1):2157099. DOI: 10.1080/23311932.2022.2157099

Dwivedi S.L., Spillane C., Lopez F., Ayele B.T., Ortiz R. First the seed: Genomic advances in seed science for improved crop productivity and food security. *Crop Science*. 2021;61(3):1501-1526. DOI: 10.1002/csc2.20402

Janmohammadi M., Sabaghnia N., Nouraein M. Path analysis of grain yield and yield components and some agronomic traits in bread wheat. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2014;62(5):945-952. DOI: 10.11118/actaun201462050945

Kakaei M., Farshadfar M. Studies on genetic parameters, heritability, and path analysis under irrigated and rainfed conditions in chickpea. *Plant Molecular Biology Reporter*. 2025;1:1-12. DOI: 10.1007/s11105-025-01534-0

Mohammed S., Tiku K., Daniel F. A promising genotype of *Lepidium sativum* for enhanced yield and agronomic performances under optimal growth conditions. *Horticulturae*. 2025;11(2):153. DOI: 10.3390/horticulturae11020153

Mohebodini M., Sabaghnia N., Janmohammadi M. Interrelationships between seed yield and 16 related traits of 81 garden cress landraces. *HortScience*. 2018;53(7):946-948. DOI: 10.21273/HORTSCI12868-18

Nayebi-Aghbolag K., Sabaghnia N., Pasandi-Somehsofla M., Janmohammadi M. Study of correlation coefficients of agronomic traits and path analysis of seed yield in rye. *Plant Productions*. 2019;42(1):31-46. DOI: 10.22055/ppd.2019.22523.1486

Rahimi V., Mohebodini M., Ghanbari A., Behnamian M., Azizinia S. The relationship between morphological traits and seed yield of Iranian garden cress accession. *Acta Scientiarum Polonorum. Hortorum Cultus*. 2019;18(3):137-145. DOI: 10.24326/asphc.2019.3.13

Sabaghnia N., Ahadnezhad A., Janmohammdi M. Genetic variation in garden cress (*Lepidium sativum* L.) germplasm as assessed by some morphological traits. Genetic *Resources and Crop Evolution*. 2015;62(5):733-745. DOI: 10.1007/s10722-014-0192-4

Sabaghnia N., Janmohammadi M. Path analysis of morphological traits influencing performance in *Cicer arietinum* genotypes under semi-arid conditions. *Acta Biologica Szegediensis*. 2024;68(1):1-8. DOI: 10.14232/abs.2024.1.1-8

Sabaghnia N., Mohebodini M., Janmohammadi M. Biplot analysis of trait relations of spinach (*Spinacia oleracea* L.) landraces. *Genetika*. 2016;48(2):675-690. DOI: 10.2298/GENSR1602675S

Saroj R., Soumya S.L., Singh S., Sankar S.M., Chaudhary R., Yashpal et al. Unraveling the relationship between seed yield and yield-related traits in a diversity panel of *Brassica juncea* using multi-traits mixed model. *Frontiers in Plant Science*. 2021;12:651936. DOI: 10.3389/fpls.2021.651936

Tadesse L., Mekbib F., Wakjira A., Tadele Z. Correlation and path coefficient analysis of yield and quality components of garden cress (*Lepidium sativum* L.) genotypes in Ethiopia. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*. 2018;10(10):290-297. DOI: 10.5897/JPBCS2018.0757

Tao Y., Li Z., Shah F., Wu W. Optimizing biomass allocation for optimum balance of seed yield and lodging resistance in rapeseed. *Field Crops Research*. 2024;316:109493. DOI: 10.1016/j.fcr.2024.109493

Wang H., Cai X., Umer M.J., Xu Y., Hou Y., Zheng J. et al. Genetic analysis of cotton fiber traits in *Gossypium* hybrid lines. *Physiologia Plantarum*. 2024;176(4):e14442. DOI: 10.1111/ppl.14442

Yoo E., Kim E.G., Lee J.E., Lee S., Lee D., Lee G.A. Genetic variations in FAD3 and its influence on agronomic traits and fatty acid composition in perilla germplasm. *Plant Science*. 2025;355:112452. DOI: 10.1016/j.plantsci.2025.112452

Zavoshti S., Sabaghnia N., Moayed F. Correlation and path coefficient analyses of dry weight yield components in the common sainfoin (*Onobrychis viciifolia* Scop.). *Journal of Agricultural Science (Belgrade)*. 2023;68(2):155-169. DOI: 10.2298/JAS2302155Z

Information about the authors

Naser Sabaghnia, PhD, Professor, Maragheh University, Amirkabir Hwy., Maragheh 83111-55181, Iran, sabaghnia@maragheh.ac.ir, https://orcid.org/0000-0001-9690-6525

Vahid Rahimi, PhD, University of Mohaghegh Ardabili, University St., Ardabil 56199-11367, Iran, vahidrahimi2010@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4551-485X

Mehdi Mohebodini, PhD, Professor, University of Mohaghegh Ardabili, University St., Ardabil 56199-11367, Iran, mohebodini@uma.ac.ir, https://orcid.org/0000-0001-6359-3200

Mohsen Janmohammadi, PhD, Professor, Maragheh University, Amirkabir Hwy., Maragheh 83111-55181, Iran, mjanmohammadi@maragheh.ac.ir, https://orcid.org/0000-0002-6121-6791

Информация об авторах

Насер Сабагния, доктор философии, профессор, Университет Мараге, 83111-55181 Иран, Мараге, шоссе Амиркабир, sabaghnia@maragheh.ac.ir, https://orcid.org/0000-0001-9690-6525

Вахид Рахими, доктор философии, Университет Мохагег Ардабили, 56199-11367 Иран, Ардебиль, ул. Университетская, vahidrahimi2010@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4551-485X

Мехди Мохебодини, доктор философии, профессор, Университет Мохагег Ардабили, 56199-11367 Иран, Ардебиль, ул. Университетская, mohebodini@uma.ac.ir, https://orcid.org/0000-0001-6359-3200

Мохсен Джанмохаммади, доктор философии, профессор, Университет Мараге, 83111-55181 Иран, Мараге, шоссе Амиркабир, mjanmohammadi@maragheh.ac.ir, https://orcid.org/0000-0002-6121-6791

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.
Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The article was submitted on 12.05.2025; approved after reviewing on 11.06.2025; accepted for publication on 11.08.2025.
Статья поступила в редакцию 12.05.2025; одобрена после рецензирования 11.06.2025; принята к публикации 11.08.2025.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 631.527:633.852.73
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-140-149

CC BY

Селекционная оценка гибридов *Olea europaea* L.

С. Ю. Цюпка, И. В. Булавин, Н. А. Таран, А. В. Синченко, В. А. Цюпка

Никитский ботанический сад – Национальный научный центр Российской академии наук, Ялта, Россия

Автор, ответственный за переписку: Сергей Юрьевич Цюпка, tsupkanbg@mail.ru

Актуальность. Селекция новых высокоурожайных сортов является одной из наиболее эффективных стратегий повышения производства *Olea europaea* L. По данным IOC (International Olive Council), мировое выращивание маслины оценивается в 10,9 млн га и имеет тенденцию к увеличению. Повышение спроса на консервированные плоды и оливковое масло стимулирует производителей наращивать объемы производства. Внедрение новых высокопродуктивных сортов *O. europaea* с высоким содержанием масла в плодах является актуальной задачей.
Материалы и методы. Исследования проводились в 2022–2024 гг. на 60 гибридах маслины селекции Никитского ботанического сада. В качестве контроля использовались два промышленных сорта итальянского происхождения – 'Ascolano' и 'Corregiolo'.
Результаты. Изучены основные хозяйственно-биологические признаки у 60 перспективных гибридов (урожайность, масса плода, содержание масла, соотношение мякоти и косточки, сроки прохождения основных фенофаз и др.). Выявлены значительные вариации хозяйственно ценных признаков у изученных генотипов маслины европейской по массе плода – от 2,2 до 9,5 г, по содержанию масла в плодах – от 16 до 33%, по соотношению мякоти и косточки – от 68 до 92%, по урожайности – от 1,6 до 12,8 т/га. По комплексу экономически значимых признаков наибольший интерес для производственного испытания представляют гибридные формы 35-6/15, 35-5/31, 35-9/5, 35-16/13, которые могут быть использованы для создания отечественного сортимента *O. europaea*.
Заключение. Выделены генотипы *O. europaea*, превосходящие по комплексу хозяйственно ценных признаков коммерческие сорта итальянской селекции 'Ascolano' и 'Corregiolo'. Высокая урожайность, содержание масла в плодах и крупноплодность делает эти гибриды перспективными для использования в селекции и производственного испытания в условиях юга России. По результатам исследований гибридная форма 35-16/13 передана для регистрации в Госреестр сортов и гибридов, допущенных к использованию.

Ключевые слова: маслина, урожайность, содержание масла, размер плодов, сорт, гибрид

Благодарности: исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 24-26-00066 (https://rscf.ru/project/24-26-00066/) на базе Уникальной научной установки «ФИТОБИОГЕН» и ЦКП «Физиолого-биохимические методы исследования растительных объектов».
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Цюпка С.Ю., Булавин И.В., Таран Н.А., Синченко А.В., Цюпка В.А. Селекционная оценка гибридов *Olea europaea* L. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(3):140-149. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-140-149

© Цюпка С.Ю., Булавин И.В., Таран Н.А., Синченко А.В., Цюпка В.А., 2025

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-140-149

Evaluation of *Olea europaea* L. hybrids for breeding

Sergei Yu. Tsiupka, Iliya V. Bulavin, Nikita A. Taran, Anastasia V. Sinchenko, Valentina A. Tsiupka

Nikita Botanical Gardens – National Research Center of the Russian Academy of Sciences, Yalta, Russia

Corresponding author: Sergei Yu. Tsiupka, tsupkanbg@mail.ru

Background. Breeding of new high-yielding cultivars is one of the most effective strategies to increase yields of *Olea europaea* L. According to the International Olive Council (IOC), the world's olive cultivation is estimated at 10.9 million hectares and tends to increase. Rising demand for canned fruits and olive oil stimulates producers to increase production. Thus, introduction of new high-yielding cultivars with high oil content in fruits is an urgent task.
Materials and methods. Studies were conducted on 60-year-old trees planted at a distance of 5 × 5 m from each other, with a planting density of 400 trees per ha^{-1} and southern exposure of the slope. The experiment was conducted in 2022–2024 on the leaves of 60 olive hybrids developed at the Nikita Botanical Gardens. Two commercial Italian cultivars, 'Ascolano' and 'Corregiolo', were used as a control.
Results. Main agronomic and biological traits of 60 promising hybrids were studied (yield, fruit weight, oil content, pulp/stone ratio, timing of the main phenophases, etc.).
Significant variations of useful agronomic characters, such as fruit weight (from 2.2 to 9.5 g), fruit oil content (from 16 to 33%), pulp to stone ratio (from 68 to 92%), and yield (from 1.6 to 12.8 t/ha), were revealed in the studied genotypes of European olives. Based on a set of important agronomic characteristics, hybrid forms most interesting for production testing were identified: 35-6/15, 35-5/31, 35-9/5, and 35-16/13. They can be used to produce a domestic assortment of *O. europaea*.
Conclusion. *O. europaea* hybrid genotypes were selected that surpassed cvs. 'Ascolano' and 'Corregiolo' in a set of important agronomic traits. Good yields, large fruits, and high oil content make these hybrids promising for use in breeding and production trials in the south of Russia.

Keywords: olive, yield, oil content, fruit size, cultivar, hybrid

Acknowledgements: the study was supported from the funds allotted by the Russian Science Foundation, Grant No. 24-26-00066 (https://rscf.ru/project/24-26-00066/), and performed on the equipment of the FITOBIOGEN Unique Research Facility and the Collective Use Center "Physiological and Biochemical Methods of Plant Research".
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Tsiupka S.Yu., Bulavin I.V., Taran N.A., Sinchenko A.V., Tsiupka V.A. Evaluation of *Olea europaea* L. hybrids for breeding. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(3):140-149. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-140-149

Введение

Маслина – одно из старейших возделываемых растений в Средиземноморье и во всем мире. Вид принадлежит к семейству Oleaceae, которое включает около 28 родов и около 700 видов. Известны две основные разновидности *Olea europaea* L.: *O. europaea* var. *europaea* и *O. europaea* var. *sylvestris* Brot. (Mnasri et al., 2025). Выращивание оливковых деревьев остается одним из важнейших видов сельскохозяйственной деятельности во всем мире, внося значительный вклад в экономику и культуру (Anagnostopoulos et al., 2025).

Оливковое масло является неотъемлемой частью рациона населения стран Средиземноморского региона и ценится во всем мире за свои вкусовые характеристики, сочетающие в себе тонкий аромат и приятный вкус с высокой пищевой ценностью (Li et al., 2025).

Результаты прогнозирования производства маслины и спроса на плоды и оливковое масло предполагают существенное будущее увеличение производства в новых странах-производителях параллельно с более медленным ростом традиционных европейских поставщиков. Кроме того, ожидается значительный рост мирового спроса на оливковое масло на нетрадиционных рынках, что обусловлено большей осведомленностью о положительных свойствах этого продукта для здоровья, а также изменениями в образе жизни и ростом доходов нескольких потребительских сегментов. Эти развивающиеся рынки предлагают многообещающие перспективы для международной экспансии компаний по производству оливкового масла (Mili et al., 2021).

Несмотря на то что Европа сохраняет лидирующие позиции в производстве плодов маслины, по данным ФАО ООН, наблюдается значительный рост производства в странах Африки и Азии (https://www.fao.org/faostat/en/#home; http://www.internationaloliveoil.org).

В Российской Федерации сходные почвенно-климатические условия культигенного ареала маслины имеет Крым, что делает *O. europaea* перспективной масличной культурой для юга нашего государства. В настоящее время она выращивается в субтропической зоне Крыма и Краснодарского края, однако благодаря высокой экологической пластичности вида есть потенциал для выращивания его и в других южных регионах России.

В Никитском ботаническом саду создан уникальный генофонд маслины, включающий 267 сортов и около 2000 гибридных форм. Это хорошая база для получения сортов с определенными признаками (Slobodova et al., 2023). Их можно считать бесценным резервуаром генетического разнообразия, и они могут иметь большой потенциал для создания новых сортов с высокой урожайностью, хорошим качеством плодов, высоким содержанием оливкового масла и другими важными хозяйственно ценными качествами.

Целью нашей работы являлась комплексная оценка новых гибридных форм маслины европейской и выделение наиболее перспективных генотипов для использования в селекции и производственного выращивания.

Материалы и методы

Для исследований использовали многолетние растения *O. europaea*, произрастающие на коллекционных участках Никитского ботанического сада – Национального научного центра (НБС – ННЦ, Ялта) в одинаковых климатических и почвенных условиях. Места отбора проб и проведения экспериментов обозначены координатами GPS (44°51′24″N, 34°23′94″E, 200 м н. у. м.). В этом районе – субтропический климат с сухим и жарким летом и влажной зимой, при этом осадки в основном концентрируются в осенний и зимний сезоны. Среднегодовая продолжительность солнечного сияния составляет 2285 часов, количество осадков – 188 мм с мая по сентябрь и 595 мм за весь год. Абсолютный максимум температуры составляет 39,0°C, абсолютный минимум равен −14,6°C, среднегодовая температура – +12,4°C, среднегодовая влажность воздуха – 67%. Почва бурая, слабоизвестковая, тяжелосуглинистая, на глинистых сланцах и известняках (Korsakova, Korsakov, 2020).

Исследования проводились в 2022–2024 гг. на 60–70-летних деревьях со схемой посадки 5 × 5 м (400 деревьев на гектар) на склоне южной экспозиции. Контрольные сорта: ‘Corregiolo’ – мировой стандарт, один из наиболее распространенных сортов масличного назначения (http://www.internationaloliveoil.org); ‘Ascolano’ (syn. ‘Ascolana Tenera’) – промышленный сорт столового (консервного) назначения, мировой стандарт в засухоустойчивости маслины европейской (Faraloni et al., 2011; Liu et al., 2013; http://www.internationaloliveoil.org). Страна происхождения обоих контрольных сортов – Италия.

Оценка продуктивности и сроков прохождения фенологических фаз проведена по методике Н. С. Самигуллиной (Samigullina, 2006). Фенофазу «начало цветения» отмечали, когда раскрываются первые цветки (до 5% почек), а фенофазу «конец цветения» – когда на дереве остается в целом состоянии более 25% цветков, а у остальных лепестки в той или иной степени уже опали. Датой начала созревания считали день, когда начинали созревать первые здоровые плоды. Съемная зрелость отмечалась, когда плоды приобретали свойственную сорту окраску и мякоть их становилась пригодной для переработки.

Содержание оливкового масла в плодах определяли согласно методу S. Lavee с соавторами (Lavee et al., 1988). Для каждого измерения 5 г свежего мезокарпия высушивали при температуре 80°C, измельчали в течение 2 мин с помощью гомогенизатора Ultra Turrax (IKA, Германия) на средней скорости, экстрагировали 10 мл 1-хлорнафталина (1-CL-N) в течение 30 мин, уравновешивали при комнатной температуре в течение 30 мин, пропускали через быстрый бумажный фильтр. Индекс рефракции определяли с помощью рефрактометра Nar-3T (Atago, Япония) при 25°C. Температуру образцов (25°C) поддерживали на водяной бане 60-C5 (Atago, Япония). Результаты выводились на калибровочной кривой, подготовленной с оливковым маслом. Фактическое считывание каждого образца повторяли три раза.

Статистический анализ данных выполняли с использованием пакета прикладных программ Microsoft Office (Excel), графическую обработку – в Phyton-библиотеках Matplotlib and Scikit-learn.

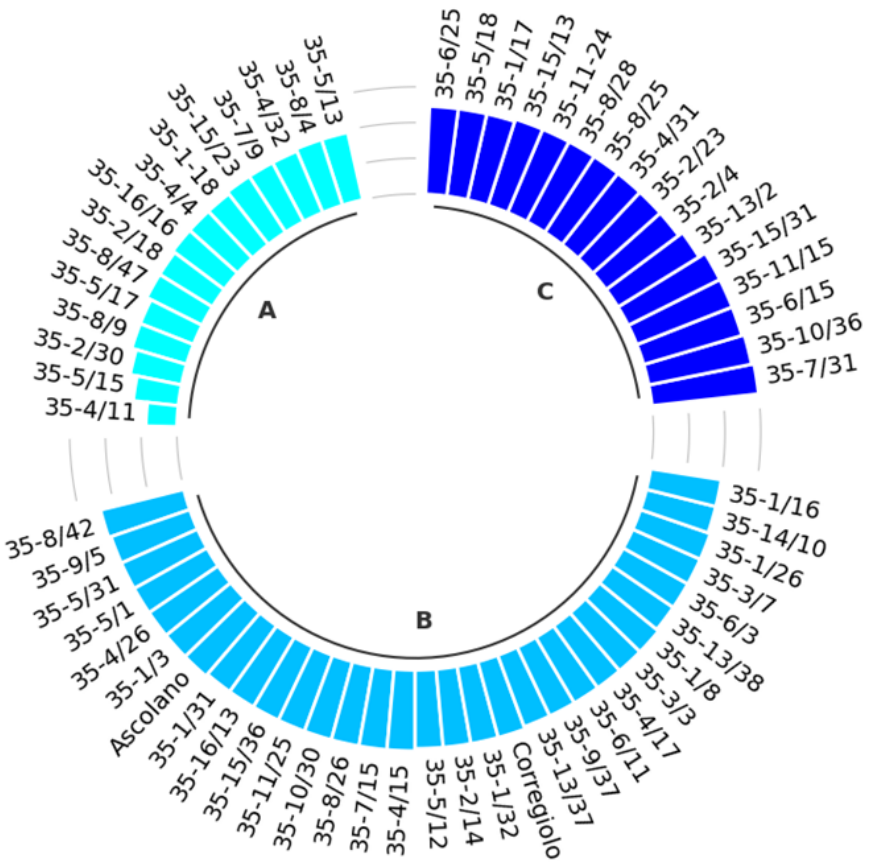
Результаты

Отмечено, что наиболее раннее прохождение фенофазы «начало цветения» зафиксировано 19.05 у гибрида 35-5/15 (продолжительность цветения 14 дней), а наиболее позднее – 14.06 у гибрида 35-7/31 (рис. 1).

По срокам прохождения фенофаз «начало цветения» и «конец цветения» проведена кластеризация методом *k-means* и группировка на сорта и гибриды с ранним, средним и поздним сроком цветения (рис. 2). Выделено

Рис. 1. **Сроки цветения и созревания гибридных форм *Olea europaea* L.**

Fig. 1. **Flowering and ripening schedules of *Olea europaea* L. hybrids**



Кластер А – генотипы с ранним сроком цветения; **кластер В** – генотипы со средним сроком цветения; **кластер С** – генотипы с поздним сроком цветения /
Cluster A – genotypes with an early flowering period; **cluster B** – genotypes with a medium flowering period; **cluster C** – genotypes with a late flowering period

Рис. 2. Ранжировка сортов и гибридов *Olea europaea* L. по срокам цветения (кластеризации методом *k-means*)
Fig. 2. Ranking of *Olea europaea* L. cultivars and hybrids according to flowering schedules (clustering by the *k-means* method)

15 генотипов, цветение которых проходит в ранние сроки, когда среднесуточная температура воздуха достигает 20°С. В этот период содержание почвенной влаги является оптимальным для формирования будущего урожая.

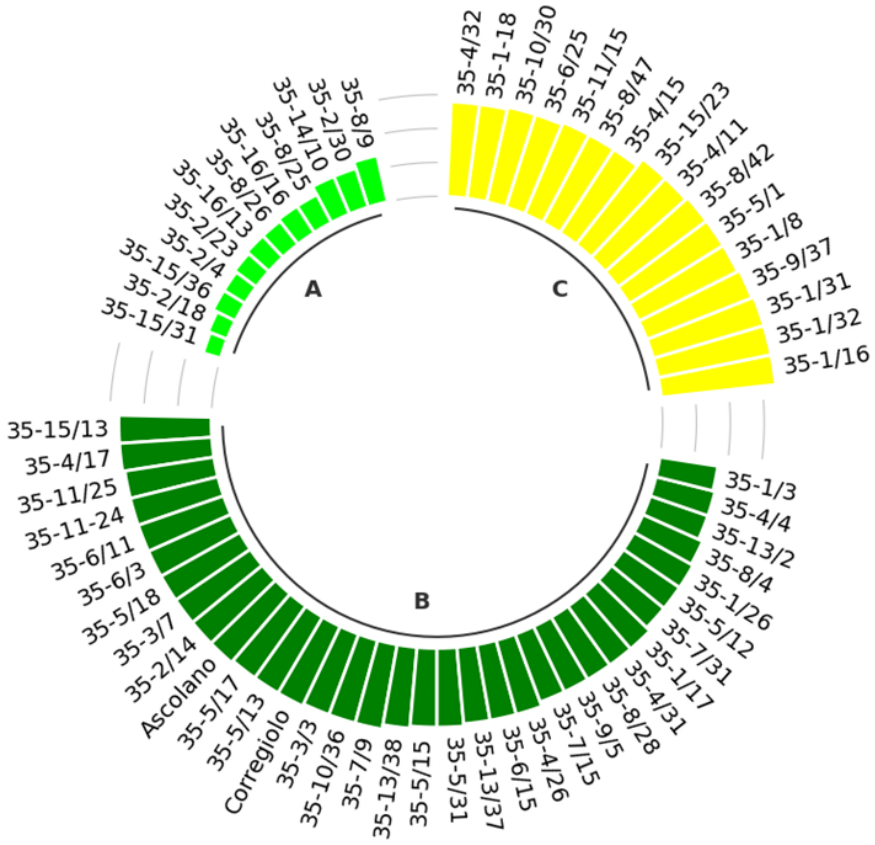
Фенофазы «начало созревания» и «конец созревания» играют важную роль в связи со сроками сбора урожая. Наиболее перспективными являются генотипы с ранними сроками созревания плодов в связи с тем, что позднозревающие генотипы нередко подвержены повреждению плодов морозом. Наиболее раннее созревание плодов отмечено у гибридной формы 35-15/31 (с 08.10 по 20.10), что на месяц раньше, чем у контрольных сортов ‘Corregiolo’ (08.11–16.11) и ‘Ascolano’ (10.11–19.11). По срокам прохождения фенофаз «начало созревания» и «конец созревания» также проведена кластеризация методом *k-means* и ранжировка сортов и гибридов на группы с ранним, средним и поздним созреванием плодов (рис. 3). Выделено 12 генотипов, отличающихся ранним созреванием, которые перспективны для селекции на признак раннеспелости плодов. Контрольные сорта по срокам созревания выделены в группу со средним сроком созревания плодов.

Урожайность сортов и гибридных форм варьировала от 1,6 до 12,8 т/га (рис. 4). Выделено 13 генотипов, которые по урожайности превосходят контрольные сорта. Лучшую урожайность показали гибридные формы 35-16/13 (12,80 т/га), 35-5/18 (10,76 т/га), 35-8/28 (10,28 т/га), 35-8/4 (10,04 т/га). Средняя масса плодов у сортов и гибридных форм варьировала от 2,0 до 9,6 г. Выделено 20 гибридных форм с крупными плодами массой 5 и более граммов (см. рис. 4). Наиболее крупными плодами характеризовались следующие генотипы: ‘Ascolano’ (9,6 г), 35-7/31 (9,5 г), 35-5/31 (6,4 г), 35-6/15 (6,4 г), 35-5/15 (6,1 г), 35-9/5 (6,0 г), которые можно использовать как сорта столового (консервного) назначения. Средняя масса плодов у мирового стандарта – сорта масличного назначения ‘Corregiolo’ – составляла 2,7 г.

Одним из экономически значимых признаков является соотношение мякоти и косточки, служащее важным критерием при производстве оливкового масла. Соотношение мякоти и косточки в плодах изученных генотипов варьировала от 68 до 92% (см. рис. 4). У контрольных сортов этот показатель составлял 88% (‘Ascolano’) и 76% (‘Corregiolo’).

Выделено четыре гибридные формы: 35-4/32, 35-6/15, 35-16/13 и 35-5/15, которые характеризовались самым высоким соотношением мякоти и косточки (90–92%).

Отмечено, что содержание масла в плодах изученных образцов колебалось от 16% (гибрид 35-5/1) до 33% (гибридные формы 35-13/2 и 35-3/7) (см. рис. 4). Восемь генотипов по содержанию масла находятся на уровне или



Кластер А – генотипы с ранним сроком цветения; **кластер В** – генотипы со средним сроком цветения; **кластер С** – генотипы с поздним сроком цветения /
Cluster A – genotypes with an early flowering period; **cluster B** – genotypes with a medium flowering period; **cluster C** – genotypes with a late flowering period

Рис. 3. Ранжировка сортов и гибридов *Olea europaea* L. по срокам созревания плодов (кластеризация методом *k-means*)
Fig. 3. Ranking of *Olea europaea* L. cultivars and hybrids according to fruit ripening schedules (clustering by the *k-means* method)

превосходят один из лучших масличных сортов Средиземноморского региона – сорт 'Corregiolo' с содержанием оливкового масла 30%. Масличность контрольного сорта столового (консервного) назначения 'Ascolano' значительно уступала практически всем генотипам и составляла 18%.

По комплексу хозяйственно ценных признаков наибольший интерес для производственного испытания представляют гибридные формы 35-6/15, 35-5/31, 35-9/5, 35-16/13 (рис. 5).

Плоды данных гибридов могут использоваться как для консервации, так и для получения оливкового масла. Данные генотипы отличаются крупноплодностью: средняя масса плода – 5,6–6,4 г. Содержание масла в плодах составляет 26–29%, выше – у гибрида 35-16/13. Соотношение мякоти и косточки варьирует от 88% (гибрид 35-9/5) до 92% (гибрид 35-16/13). Урожайность составляет 9,64–9,94 т/га для гибридов 35-6/15, 35-5/31, 35-9/5; максимальная – у гибрида 35-16/13 – 12,80 т/га.

Обсуждение результатов

Современное сельскохозяйственное производство *O. europaea* предъявляет высокие требования к использованию сортов, которые должны отличаться высокой устойчивостью к биотическим и абиотическим факторам, хорошей урожайностью, крупноплодностью, высоким содержанием масла в плодах и другими важными хозяйственно ценными признаками (http://www.internationaloliveoil.org).

Традиционно маслину выращивают для консервирования плодов и отжима масла; кроме того, продукты переработки плодов и листьев маслины часто используются в фармацевтической и косметической промышленности, сельском хозяйстве при производстве кормов для животных и т. д. (Mumcu, Deliboran, 2025; Masucci et al., 2025).

По данным ФАО ООН, средняя урожайность основных производителей маслины составляет 2,4 т/га в Испании, 2,7 т/га в Италии, 2,2 т/га в Греции (Russo et al., 2016; https://www.fao.org/faostat/en/#home). Стоит отметить, что на урожайность садов *O. europaea* значительное влияние оказывает схема посадки растений, наличие орошения и механизация производства (Sola-Guirado et al., 2017). Выделяют традиционные (экстенсивные) сады с плотностью посадки менее 140 деревьев на гектар и урожайностью до 3 т/га, интенсивные (от 200 до 450 деревьев/га) – с урожайностью 5–7 тонн в богарных условиях и 8–12 тонн в условиях капельного орошения, сады с высокой плотностью посадки (450 до 800 дер./га) и суперинтенсивные сады (до 2500 дер./га) со средней урожайностью около 12 т/га (Tous, 2011).

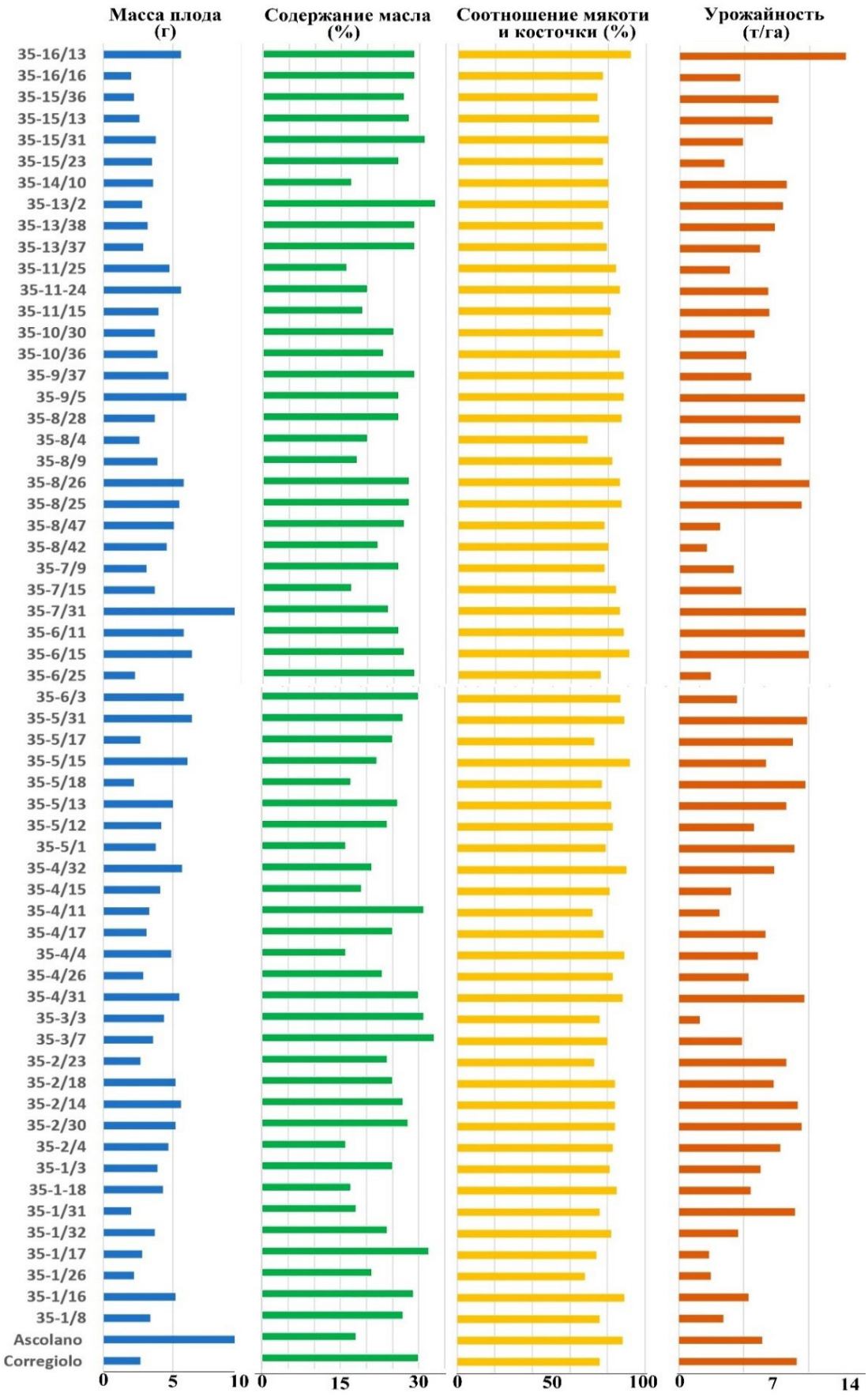


Рис. 4. **Основные хозяйственно значимые признаки гибридов**

Fig. 4. **Agronomic characters of commercial importance in hybrids**

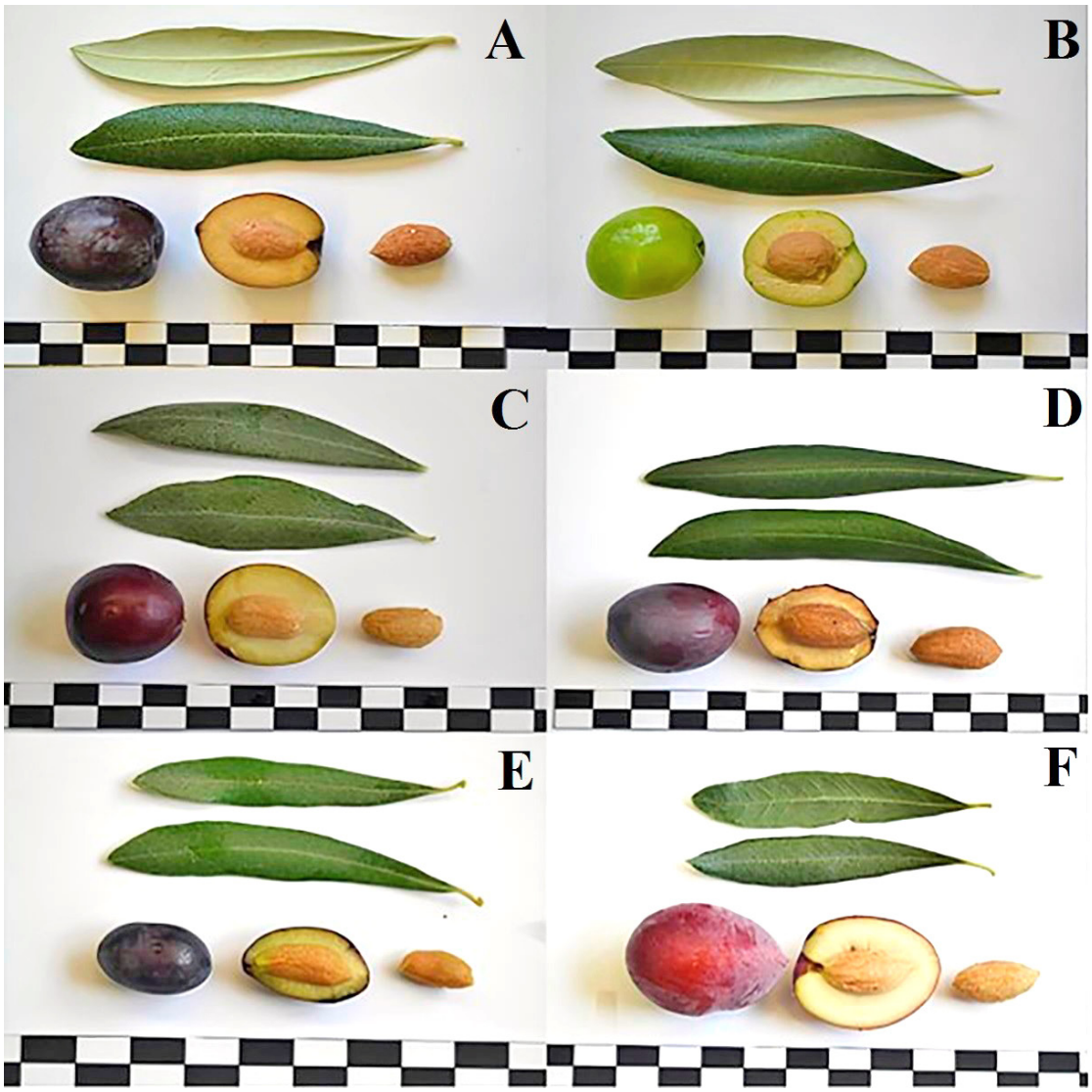


Рис. 5. Плоды, косточка и лист контрольных сортов и перспективных гибридных форм *Olea europaea* L.:
A – гибрид 35-6/15; **B** – гибрид 35-5/31; **C** – гибрид 35-9/5; **D** – гибрид 35-16/13; **E** – контрольный сорт 'Corregiolo'; **F** – контрольный сорт 'Ascolano'

Fig. 5. Fruits, stones and leaves of the control cultivars and promising hybrids of *Olea europaea* L.:
A – hybrid 35-6/15; **B** – hybrid 35-5/31; **C** – hybrid 35-9/5; **D** – hybrid 35-16/13; **E** – control cv. 'Corregiolo'; **F** – control cv. 'Ascolano'

В наших исследованиях при схеме посадки 400 деревьев на гектар урожайность коммерческих сортов составляла 9,08 т/га у масличного сорта 'Corregiolo' и 6,44 т/га у консервного сорта 'Ascolano'. Выделено 13 генотипов, отличающихся высокой урожайностью. Максимальная урожайность отмечена у гибридной формы 35-16/13 (12,8 т/га). Показано, что отдельные генотипы маслины селекции Никитского ботанического сада, выращиваемые в богарных условиях при интенсивной схеме посадки, превосходят по урожайности сорта, выращиваемые в Средиземноморском регионе.

Как отмечают C. Del Río и J. M. Caballero по результатам изучения 112 сортов в Испании, вес плода варьировал от 1,1 ('Koroneiki') до 10,4 г ('Ascolano'), со средним значением 4,0 г, а соотношение мякоть/косточка колебалось от 4,0 ('Razzola') до 13,7 ('Manzanilla de Jaen'), со средним значением 7,2 (Del Río, Caballero, 2008). Подобные результаты получены M. Dehghan-Seresht с соавторами (Dehghan-Seresht et al., 2024) при изучении 10 сортов *O. europaea* различного географического происхождения, выращиваемых в районе Алиабад (Иран). В наших исследования масса плода варьировала от 2,0 (гибрид 35-1/31) до 9,5 г (гибрид 35-7/31), в то время как у сорта консервного назначения 'Ascolano' она составила 9,6 г, а у масличного сорта 'Corregiolo' – 2,7 г. Выделено 20 гибридных форм с крупными плодами массой 5,0 и более граммов. Наиболее крупными плодами характеризовались следующие гибриды: 35-7/31 (9,5 г), 35-5/31 (6,4 г), 35-6/15 (6,4 г), 35-5/15 (6,1 г), 35-9/5 (6,0 г), которые можно использовать как генотипы столового (консервного) назначения.

Как отмечают P. Mazliak (1970) и A Morettini (1972), содержание масла в мезокарпии зрелых плодов оливы варьирует от 5 до 35% в сыром весе и от 20 до 70% в сухом весе в зависимости от сорта и условий садоводства. В наших исследованиях содержание масла в плодах сорта 'Corregiolo' составляло 30%, а сорта 'Ascolano' – 18%. Восемь генотипов по содержанию масла находятся на уров-

не или превосходят один из лучших масличных сортов Средиземноморского региона – сорт 'Corregiolo'. Максимальное содержание масла в плодах отмечено у гибридных форм 35-13/2 и 35-3/7 (33% на сырой вес мякоти плода).

Выводы

Из гибридного фонда *O. europaea* выделены генотипы, которые превосходят коммерческие сорта 'Ascolano' и 'Corregiolo' по комплексу хозяйственно ценных признаков. Их плоды универсального назначения, могут использоваться для консервации и получения оливкового масла. Данные генотипы отличаются крупноплодностью (средняя масса плода – 5,6–6,4 г), высоким содержанием масла в плодах (26–29%), хорошим соотношением мякоти и косточки (88–92%) и повышенной урожайностью (9,64–12,80 т/га), что делает эти гибриды перспективными для использования в селекции и производственного испытания в условиях юга России.

References/Литература

Anagnostopoulos C., Vidali E., Zacharia E., Dris S. Evaluation of terminal residues in olives and olive oil following a targeted large-scale plant protection application strategy in Southern Greece. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2025;140:107210. DOI: 10.1016/j.jfca.2025.107210

Dehghan-Seresht M., Khadivi A., Tunç, Y. Morphological and pomological characterizations of olive (*Olea europaea* L.) cultivars. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2024;72(5):5735-5751. DOI: 10.1007/s10722-024-02303-w

Del Río C., Caballero J.M. Variability and classification of olive cultivars by fruit weight, flesh/stone ratio and oil percentage. *Acta Horticulturae*. 2008;791:39-44. DOI: 10.17660/ActaHortic.2008.791.2

FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Food and Agriculture Data: [website]. Available from: https://www.fao.org/faostat/en/#home [accessed Mar. 15, 2025].

Faraloni C., Cutino I., Petruccelli R., Leva A.R., Lazzeri S., Torzillo G. Chlorophyll fluorescence technique as a rapid tool for *in vitro* screening of olive cultivars (*Olea europaea* L.) tolerant to drought stress. *Environmental and Experimental Botany*. 2011;73:49-56. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2010.10.011

International Olive Council: [website]. Available from: http://www.internationaloliveoil.org [accessed Feb. 24, 2025].

Korsakova S.P., Korsakov P.B. Climate references of the 2019 seasons on the southern coast of Crimea. *Scientific Notes of the "Cape Martyan" Nature Reserve*. 2020;(11):6-22. [in Russian] (Корсакова С.П., Корсаков П.Б. Климатическая характеристика сезонов 2019 г. на Южном берегу Крыма. *Научные записки природного заповедники «Мыс Мартьян»*. 2020;(11):6-22). DOI: 10.36305/2413-3019-2020-11-06-22

Kovaiou S.K., Kokkari A., Floros G., Kantiranis N., Kouloussis N.A., Filippidis A.A. et al. Oviposition-deterrent effect of a high-quality natural zeolite on the olive fruit fly *Bactrocera oleae*, under different conditions of temperature and relative humidity. *Insects.* 2024;15(4):256. DOI: 10.3390/insects15040256

Lavee S., Wodner M., Avidan B. A rapid refractometric method for determination of the oil content in olive (*Olea europaea*) fruit. *Advances in Horticultural Science*. 1988;2(1):33-37.

Li X., Muñoz-Díez C., Miho H., Zhang L., Li P., Priego F. et al. Evaluation of phenolics in the analysis of virgin olive oil using near infrared spectroscopy. *Spectrochimica Acta. Part A, Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2025;326:125262. DOI: 10.1016/j.saa.2024.125262

Liu H., Na H.E., Li Y.J., Ning D.L., Ting M.A., Xiao L.J. Evaluation on drought stress tolerance of six olive varieties cultivated in Yunnan. *Journal of West China Forestry Science*. 2013;42:107-110. [in Chinese]

Masucci F., Serrapica F., De Luca L., Romano R., Garofalo F., Di Francia A. Circular economy on a small scale: The sustainable use of olive tree biomass residues as feed for lactating cows in the Sorrento Peninsula. *Sustainability.* 2025;17(3):845. DOI: 10.3390/su17030845

Mazliak P. Lipids. In: A.C. Hulme (ed.). *The Biochemistry of Fruits and Their Products*. *Vol. 1.* London: Academic Press; 1970. p.209-238.

Mili S., Bouhaddane M. Forecasting global developments and challenges in olive oil supply and demand: a Delphi survey from Spain. *Agriculture.* 2021;11(3):191. DOI: 10.3390/agriculture11030191

Mnasri S.R., Montemurro C., Miazzi M.M., Debbabi O.S. Unveiling the genetic diversity of Tunisian monumental olive trees to enhance the olive sector. *Horticulturae.* 2025;*11*(2):147. DOI: 10.3390/horticulturae11020147

Morettini A. Olivicoltura: ramo editoriale degli agricoltori. Rome; 1972. [in Italian]

Mumcu A., Deliboran A. Olive stone as a sustainable agricultural by-product: valorization pathways and prospects in food and feed industries. *The North African Journal of Food and Nutrition Research*. 2025;9(SI);1-17. DOI: 10.51745/najfnr.9.SI.S1-S17

Russo C., Cappelletti G.M., Nicoletti G.M., Di Noia A.E., Michalopoulos G. Comparison of European olive production systems. *Sustainability.* 2016;8(8):825. DOI: 10.3390/su8080825

Samigullina N.S. Practical guide on breeding and cultivar development of fruit and berry crops (Praktikum po selektsii i sortovedeniyu plodovykh i yagodnykh kultur). Michurinsk: Michurinsk State Agrarian University; 2006. [in Russian] (Самигуллина Н.С. Практикум по селекции и сортоведению плодовых и ягодных культур. Мичуринск: Мичуринский государственный аграрный университет; 2006).

Slobodova N., Sharko F., Gladysheva-Azgari M., Petrova K., Tsiupka S., Tsiupka V. et al. Genetic diversity of common olive (*Olea europaea* L.) cultivars from Nikita Botanical Gardens collection revealed using RAD-Seq method. *Genes.* 2023;14(7):1323. DOI: 10.3390/genes14071323

Sola-Guirado R.R., Castillo-Ruiz F.J., Jiménez-Jiménez F., Blanco-Roldan G.L., Castro-Garcia S., Gil-Ribes J.A. Olive actual "on year" yield forecast tool based on the tree canopy geometry using UAS imagery. *Sensors.* 2017;17(8):1743. DOI: 10.3390/s17081743

Tous J. Olive production systems and mechanization. *Acta Horticulturae*. 2011;924:169-184. DOI: 10.17660/ActaHortic.2011.924.22

Информация об авторах

Сергей Юрьевич Цюпка, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Никитский ботанический сад – Национальный научный центр Российской академии наук, 298648 Россия, Республика Крым, Ялта, Никита, Никитский спуск, 52, tsupkanbg@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1678-014X

Илья Владимирович Булавин, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией, Никитский ботанический сад – Национальный научный центр Российской академии наук, 298648 Россия, Республика Крым, Ялта, Никита, Никитский спуск, 52, cellbiolnbs@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-9929-0946

Никита Александрович Таран, инженер-исследователь, Никитский ботанический сад – Национальный научный центр Российской академии наук, 298648 Россия, Республика Крым, Ялта, Никита, Никитский спуск, 52, alexhiryanov@gmail.com, https://orcid.org/0009-0006-5525-0922

Анастасия Вячеславовна Синченко, младший научный сотрудник, Никитский ботанический сад – Национальный научный центр Российской академии наук, 298648 Россия, Республика Крым, Ялта, Никита, Никитский спуск, 52, nas.sin4enko@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-4079-2418

Валентина Анатольевна Цюпка, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, заведующая лабораторией, Никитский ботанический сад – Национальный научный центр Российской академии наук, 298648 Россия, Республика Крым, Ялта, Никита, Никитский спуск, 52, valentina.brailko@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-3853-0210

Information about the author

Sergei Yu. Tsiupka, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, Nikita Botanical Gardens – National Research Center of the Russian Academy of Sciences, 52 Nikitsky Spusk, Nikita, Yalta 298648, Republic of Crimea, Russia, tsupkanbg@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1678-014X

Iliya V. Bulavin, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Head of a Laboratory, Nikita Botanical Gardens – National Research Center of the Russian Academy of Sciences, 52 Nikitsky Spusk, Nikita, Yalta 298648, Republic of Crimea, Russia, cellbiolnbs@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-9929-0946

Nikita A. Taran, Research Engineer, Nikita Botanical Gardens – National Research Center of the Russian Academy of Sciences, 52 Nikitsky Spusk, Nikita, Yalta 298648, Republic of Crimea, Russia, alexhiryanov@gmail.com, https://orcid.org/0009-0006-5525-0922

Anastasia V. Sinchenko, Associate Researcher, Nikita Botanical Gardens – National Research Center of the Russian Academy of Sciences, 52 Nikitsky Spusk, Nikita, Yalta 298648, Republic of Crimea, Russia, nas.sin4enko@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-4079-2418

Valentina A. Tsiupka, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Head of a Laboratory, Nikita Botanical Gardens – National Research Center of the Russian Academy of Sciences, 52 Nikitsky Spusk, Nikita, Yalta 298648, Republic of Crimea, Russia, valentina.brailko@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-3853-0210

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 28.03.2025; одобрена после рецензирования 17.06.2025; принята к публикации 09.07.2025.
The article was submitted on 28.03.2025; approved after reviewing on 17.06.2025; accepted for publication on 09.07.2025.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 581.1:58.084:631.524.84
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-150-162

CC BY

Влияние дополнительного УФ-А-облучения на некоторые биохимические и морфометрические показатели картофеля в условиях защищенного грунта

С. В. Щербёнок[1, 2], Т. Н. Лисина[1], С. Л. Елисеев[2], Д. Ю. Каракайтис[1]

[1] Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, Пермский край, Россия

[2] Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова, Пермь, Россия

Автор, ответственный за переписку: София Вячеславовна Щербёнок, sshcherbenok@bk.ru

Актуальность. Ультрафиолетовое излучение ближнего диапазона (УФ-А) является важным экологическим фактором для растений. В условиях защищенного грунта растения могут испытывать недостаток УФ-облучения из-за поглощения его покровными материалами теплиц, что может негативно сказаться на физиологических процессах.
Материалы и методы. В данном экспериментальном исследовании проанализировано влияние УФ-А-облучения на меристемные растения картофеля сортов ‘Шах’ и ‘Невский’ после их пересадки в грунт в условиях защищенного грунта (пленочная теплица). В теплице оборудован сектор со светодиодными светильниками (длина волны – 380 нм). Растения-регенеранты подвергали ежедневному 60-минутному облучению в вечернее время в течение 10, 20 и 30 суток (варианты опыта: УФ1, УФ2, УФ3), контрольный вариант не подвергался дополнительному УФ-А-облучению.
Результаты. В ходе проведенных исследований выявлено влияние УФ-А-облучения на биохимические показатели картофеля: содержание фотосинтетических пигментов в листьях, уровень сухого вещества, крахмала и общего сахара в клубнях. Результаты эксперимента показали, что дополнительное УФ-А-облучение способствовало увеличению количества мини-клубней. У растений картофеля сорта ‘Невский’ общее число мини-клубней возросло на 30% в варианте опыта УФ1, в то время как средняя масса мини-клубня уменьшилась на 10%. У растений сорта ‘Шах’ наблюдалось увеличение количества мини-клубней на 10% во всех вариантах опыта с УФ-А-досветкой. Наибольшее содержание сухого вещества в мини-клубнях сортов ‘Шах’ и ‘Невский’ отмечали при 10-дневной досветке УФ-А-облучением. Содержание крахмала в мини-клубнях обоих сортов было высоким, наибольшим – в варианте опыта с досветкой 30 суток.
Заключение. УФ-облучение стимулирует фотосинтетические процессы, увеличивая содержание хлорофилла и каротиноидов, а также влияет на углеводный метаболизм, что приводит к повышению содержания сахаров и крахмала в клубнях картофеля, к увеличению количества сформированных мини-клубней.

Ключевые слова: *Solanum tuberosum* L., УФ-А-облучение, теплица, фотосинтетические пигменты, мини-клубни, меристемные растения

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания, номер регистрации НИОКТР 122031100058-3.
Коллектив авторов благодарит Научный селекционно-технологический центр в области картофелеводства Уральского НИИСХ – филиала УрФАНИЦ УрО РАН за предоставленные для исследования меристемные растения картофеля; ООО ГК «Световые и Электрические Технологии» за предоставленные для исследования светильники.
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Щербёнок С.В., Лисина Т.Н., Елисеев С.Л., Каракайтис Д.Ю. Влияние дополнительного УФ-А-облучения на некоторые биохимические и морфометрические показатели картофеля в условиях защищенного грунта. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(3):150-162. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-150-162

© Щербёнок С.В., Лисина Т.Н., Елисеев С.Л., Каракайтис Д.Ю., 2025

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-150-162

The effect of additional UV-A irradiation on some biochemical and morphometric indicators in potato under greenhouse conditions

Sofya V. Shcherbyonok[1, 2], Tatyana N. Lisina[1], Sergey L. Eliseev[2], Dmitriy J. Karakajtis[1]

[1] *Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm Research Institute of Agriculture, Perm Territory, Russia*

[2] *Perm State Agro-Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov, Perm, Russia*

Corresponding author: Sofya V. Shcherbyonok, sshcherbenok@bk.ru

Background. Ultraviolet (UV-A) radiation is an important environmental factor with a significant impact on plants. Plants in greenhouses often experience a deficiency in UV-A radiation that can negatively affect their physiological processes.
Materials and methods. An experimental study was conducted to analyze the effect of UV-A irradiation on meristem plants of potato cvs. 'Shakh' and 'Nevsky' after their transplantation to a summer greenhouse. One sector of the greenhouse was equipped with lamps emitting light at a wavelength of 380 nm. Regenerated potato plants of both cultivars were exposed to radiation for 10, 20, and 30 days (experiment variants: UV1, UV2, and UV3) for one hour in the evening.
Results. The analysis revealed the effect of UV-A irradiation on the biochemical parameters in potato, including concentration of photosynthetic pigments in the leaves, as well as the content of dry matter, starch, and total sugars in the tubers. Additionally, morphometric characteristics were studied, such as the number and weight of minitubers. The obtained results showed that UV-A irradiation induced an increase in the number of minitubers and reduced their weight. For cv. 'Nevsky', the total number of minitubers increased by 30% in the UV1 variant, while their average weight decreased by 10%. For cv. 'Shakh', an increase in the number of minitubers by 10% was observed in all variants of exposure to UV-A. The maximum content of dry matter in minitubers of both cultivars was registered under the 10-day exposure, exceeding the control by 9.5%. The starch content in the two cultivars was high, with a maximum observed under UV3 treatment.
Conclusion. UV irradiation stimulates photosynthetic processes, increasing the content of chlorophyll and carotenoids, and also affects carbohydrate metabolism, which leads to an increase in the content of sugars and starch in potato tubers and an increased number of minitubers developed on regenerated plants.

Keywords: *Solanum tuberosum* L., UV-A irradiation, greenhouse, photosynthetic pigments, minitubers, meristem plants

Acknowledgements: the work was performed as part of a state task; registration No. of the research and development project is 122031100058-3.
The team of authors express their gratitude to the Scientific Breeding and Technological Center for Potato Production of the Ural Research Institute of Agriculture, branch of the Ural Federal Agrarian Research Center, UrB RAS, for providing potato meristem plants for the study, and to LLC *Light and Electric Technologies* for supplying the lighting fixtures used in the research.
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Shcherbyonok S.V., Lisina T.N., Eliseev S.L., Karakajtis D.J. The effect of additional UV-A irradiation on some biochemical and morphometric indicators in potato under greenhouse conditions. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(3):150-162. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-150-162

Введение

Картофель – одна из самых важных сельскохозяйственных культур, которую успешно возделывают в разных климатических условиях. Это делает культивирование картофеля значимым не только для сельского хозяйства, но и для экономики в целом, а также для обеспечения продовольственной безопасности населения России (Sayapova et al., 2018). Благодаря универсальности и питательным свойствам картофель стал основным продуктом питания во многих странах.

Рост и развитие картофеля зависят от множества факторов, включая климатические условия, тип почвы, доступность воды и удобрений, а также агрономические приемы. Учет этих факторов позволяет оптимизировать условия для достижения высокого урожая и улучшения качества клубней (Akkamis, Caliskan, 2024). Одним из ключевых факторов, влияющих на рост и развитие картофеля, является свет. Световые потоки с различной длиной волны играют значительную роль в фотосинтетических процессах, что оказывает влияние на рост и развитие растений картофеля (Gervais et al., 2021; Smirnova, Podolian, 2024).

Световой спектр, достигающий поверхности Земли, включает в себя около 7% ультрафиолетового излучения, и изучение его воздействия на растения имеет огромное значение. Это знание не только углубляет наше понимание основных закономерностей биологических процессов, происходящих под воздействием различных факторов, но и открывает новые перспективы для практического применения. Например, использование дополнительного УФ-излучения может стимулировать синтез органических веществ в растениях, а также изменять продолжительность физиологических фаз их развития. Это создает возможности для внедрения инновационных аграрных технологий, которые могут значительно повысить продуктивность и устойчивость сельского хозяйства (Solovchenko, Merzlyak, 2008).

Актуально изучение освещенности в условиях защищенного грунта, используемые покрытия которого задерживают часть солнечного излучения, включая ультрафиолетовое. В современных теплицах можно контролировать микроклимат, уровень влажности и температуру, что позволяет создать оптимальные условия для роста картофеля и других культур. Однако важно учитывать, что недостаток ультрафиолетового излучения может привести к снижению фотосинтетической активности и, как следствие, к уменьшению урожайности. Картофель в условиях защищенного грунта культивируют на этапе получения мини-клубней из меристемных растений.

Эффективное управление светом и другими факторами, влияющими на рост картофеля, является ключом к успешному его культивированию. Это требует комплексного подхода, включающего как научные исследования, так и практическое применение полученных знаний в агрономии. Оптимизация условий для роста картофеля может значительно улучшить не только его урожайность, но и качество, что в свою очередь скажется на благосостоянии населения и продовольственной безопасности страны.

Целью данного исследования являлось изучение влияния досветки УФ-А с длиной волны 380 нм в течение 10, 20 и 30 суток на морфометрические и биохимические показатели растений картофеля сортов ‘Шах’ и ‘Невский’, полученных методом микроклонального размножения, после пересадки их в грунт в пленочную теплицу.

Материалы и методы

Исследования проводили в Пермском НИИ сельского хозяйства в период с июня по август 2024 г. В качестве объектов исследования взяли два сорта картофеля среднеранней группы спелости, включенные в Государственный реестр селекционных достижений по Волго-Вятскому региону: ‘Шах’ и ‘Невский’.

Для исследования были использованы меристемные растения, которые культивировали *in vitro* на агаризированной питательной среде Мурасиге – Скуга в химических пробирках Ф1,5*1,6 см с 5 мл питательной среды. Питательную среду стерилизовали автоклавированием при температуре 120°С в течение 22 минут при давлении 1,0 атм. Затем растения помещали в климатический бокс и культивировали 28 суток при температуре 21–24°С и 16-часовом фотопериоде.

В эксперименте участвовало 256 растений, по 32 растения каждого сорта в каждом варианте опыта (4 варианта опыта). Далее растения извлекали из пробирок и высаживали в пятилитровые сосуды в теплицу. В качестве субстрата использована торфосмесь (низинный торф, верховой торф и песок в соотношении 2 : 2 : 1). Содержание основных питательных элементов в субстрате: азот (3,6 мг/100 г) по ГОСТ 27894.4-88 (GOST 27894.4-88…, 1989), фосфор (4,1 мг/100 г) по ГОСТ 27894.5-88 (GOST 27894.5-88…, 1989) и калий (59,0 мг/кг) по ГОСТ 27894.6-88 (GOST 27894.6-88…, 1989), общее содержание органического вещества – 41,2%.

Для определения доли задерживаемого УФ-А-излучения в течение вегетационного периода проводили замеры плотности фотонного потока вне и внутри теплицы с помощью спектрометра MK350S Premium. Замеры проводили три раза в сутки: 8:00, 14:00 и 20:00.

Для данного эксперимента в теплице оборудовали сектор со светодиодными облучателями ECOLED-BIO-70-UV Fito IP65, излучающими свет длиной волны 380 нм. Растения-регенеранты картофеля сортов ‘Шах’ и ‘Невский’ подвергали данному облучению в течение 10, 20 и 30 суток (варианты опыта УФ1, УФ2 и УФ3 соответственно) ежедневно по 60 минут в вечернее время. Растения в контрольном варианте не подвергались дополнительному УФ-облучению.

Минеральное питание обеспечивалось внесением комплексного высококачественного водорастворимого удобрения «Solar Универсал 19:19:19+МЭ», содержащего равные доли азота, фосфора и калия. Полив осуществлялся по мере необходимости. Период вегетации картофеля составил 100 суток. Учет мини-клубней проводили методом сплошной уборки по ГОСТ 33996-2016 (GOST 33996-2016…, 2020). Мини-клубни по наибольшему поперечному диаметру разделили на три фракции: от 9 до 20 мм, от 21 до 40 мм, от 41 мм и более.

Содержание фотосинтетических пигментов определяли методом спектрофотометрии на 10-й, 20-й, 30-й, 40-й и 50-й дни эксперимента. Исследуемые листья растений взвешивали, гомогенизировали в 96-процентном этиловом спирте. Каротиноиды определяли при длине волны 440,5 нм, хлорофилл *a* – при длине волны 665 нм, хлорофилл *b* – при длине волны 649 нм. Концентрации хлорофиллов и каротиноидов рассчитывали по формулам Винтерманса – де Мотса (Wintermans, de Mots, 1965). В клубнях картофеля определяли крахмал и сахара по ГОСТ 26176-19 (GOST 26176-2019…, 2020), а также сухое вещество по ГОСТ 33977-2016 (GOST 33977-2016…, 2019). В дальнейшем данные представлены на воздуш-

но-сухое вещество. Исследования проводили в трехкратной повторности. Полученные данные статистически обработаны с применением методов описательной статистики, критериев «омега-квадрат» для определения нормальности распределения выборок, Стьюдента и Краскела – Уоллиса – для определения достоверности различий между вариантами (в зависимости от нормальности распределения выборки), дисперсионного анализа. Значимыми считали различия между сравниваемыми величинами с доверительной вероятностью 95% и выше ($P \leq 0,05$).

Результаты и их обсуждение

Усредненные данные измерений уровня освещенности представлены в таблице 1. В ходе наблюдений, проведенных с 3 июня по 26 августа 2024 г., установлено, что пленочное покрытие теплицы, в которой осуществлялось исследование, поглощает в среднем 55,6% солнечного света в ультрафиолетовом диапазоне. Этот уровень поглощения может оказывать влияние на фотосинтетические процессы, протекающие в растениях, что в свою очередь может сказаться на их росте и урожайности.

ствуя захвату света и расширяя спектр поглощения (Theeuwen et al., 2022). Каротиноиды, обладая антиоксидантными свойствами, инактивируют различные активные формы кислорода (АФК) и тем самым защищают молекулы хлорофилла от окислительного повреждения (Pradedova et al., 2011; Golovko et al., 2022). Фотосинтетический аппарат растений обладает высокой чувствительностью к внешним воздействиям, включая изменения в качестве освещения и уровне ультрафиолетового излучения. Ультрафиолет может оказывать негативное влияние на фотосинтетические процессы, что приводит к изменению концентрации этих пигментов. Таким образом, мониторинг фотосинтетических пигментов позволяет не только оценивать состояние растений, но и выявлять их способности к адаптации в условиях различных стрессовых факторов (Kolodina et al., 2021; Rozentsvet et al., 2024).

Определение содержания фотосинтетических пигментов, включая хлорофилл *a* и *b* и каротиноиды, проводили на 10-е, 20-е, 30-е, 40-е и 50-е сутки эксперимента. Полученные результаты свидетельствуют о том, что уровень хлорофиллов увеличивается на протяжении всего периода облучения, однако после прекращения воздей-

Таблица 1. Интенсивность света в области ультрафиолета в период проведения опыта
Table 1. Light intensity in the ultraviolet range during the experiment

Дата / Date	Плотность фотонного потока вне теплицы, mW/m² / Photon flux density outside the greenhouse, mW/m²			Плотность фотонного потока внутри теплицы, mW/m² / Photon flux density inside the greenhouse, mW/m²			Снижение УФ, % / UV reduction, %		
	8:00	14:00	20:00	8:00	14:00	20:00	8:00	14:00	20:00
03.06.2024	20,52	9,91	6,75	8,37	5,71	2,93	59	42	57
10.06.2024	38,96	82,80	7,52	13,01	25,64	3,08	67	69	59
17.06.2024	38,31	82,13	5,50	14,83	41,62	2,50	61	49	55
24.06.2024	7,39	37,31	3,45	3,22	17,20	1,61	56	54	53
01.07.2024	33,28	47,31	18,84	15,42	27,77	8,08	54	41	57
08.07.2024	7,35	80,89	14,22	3,03	26,61	5,07	59	67	64
15.07.2024	17,63	19,05	18,42	9,83	9,06	9,24	44	52	50
22.07.2024	7,41	39,20	2,07	3,29	17,76	0,98	56	55	53
29.07.2024	8,16	33,30	3,21	3,15	15,50	1,58	61	53	51
05.08.2024	21,97	34,24	2,50	10,53	15,50	1,03	52	55	60
12.08.2024	17,86	14,83	1,96	8,16	6,39	0,86	54	57	56
19.08.2024	4,96	26,55	0,88	2,17	12,13	0,37	56	54	58
26.08.2024	11,13	58,96	0,92	5,53	27,19	0,33	50	54	64
Среднее	18,08	43,58	6,63	7,74	19,10	2,90	56,07	54,00	56,70

В середине июня в полдень был зафиксирован максимум поглощения – 69%. Количественное содержание фотосинтетических пигментов, таких как хлорофиллы *a* и *b* и каротиноиды, представляет собой один из ключевых биохимических аспектов их адаптации к стрессовым факторам (Nikonovich et al., 2018). Хлорофилл *a* является основным компонентом фотосистем I и II, в то время как хлорофилл *b* выполняет вспомогательную роль, способствия ультрафиолетового излучения наблюдается резкое снижение их содержания. Аналогичные изменения фиксировались и для каротиноидов. Статистически значимые различия в содержании пигментов выявили уже на первом этапе измерений (рис. 1). Растения обоих сортов в экспериментальных вариантах опыта демонстрировали более высокие уровни содержания пигментов по сравнению с растениями в контрольном варианте.

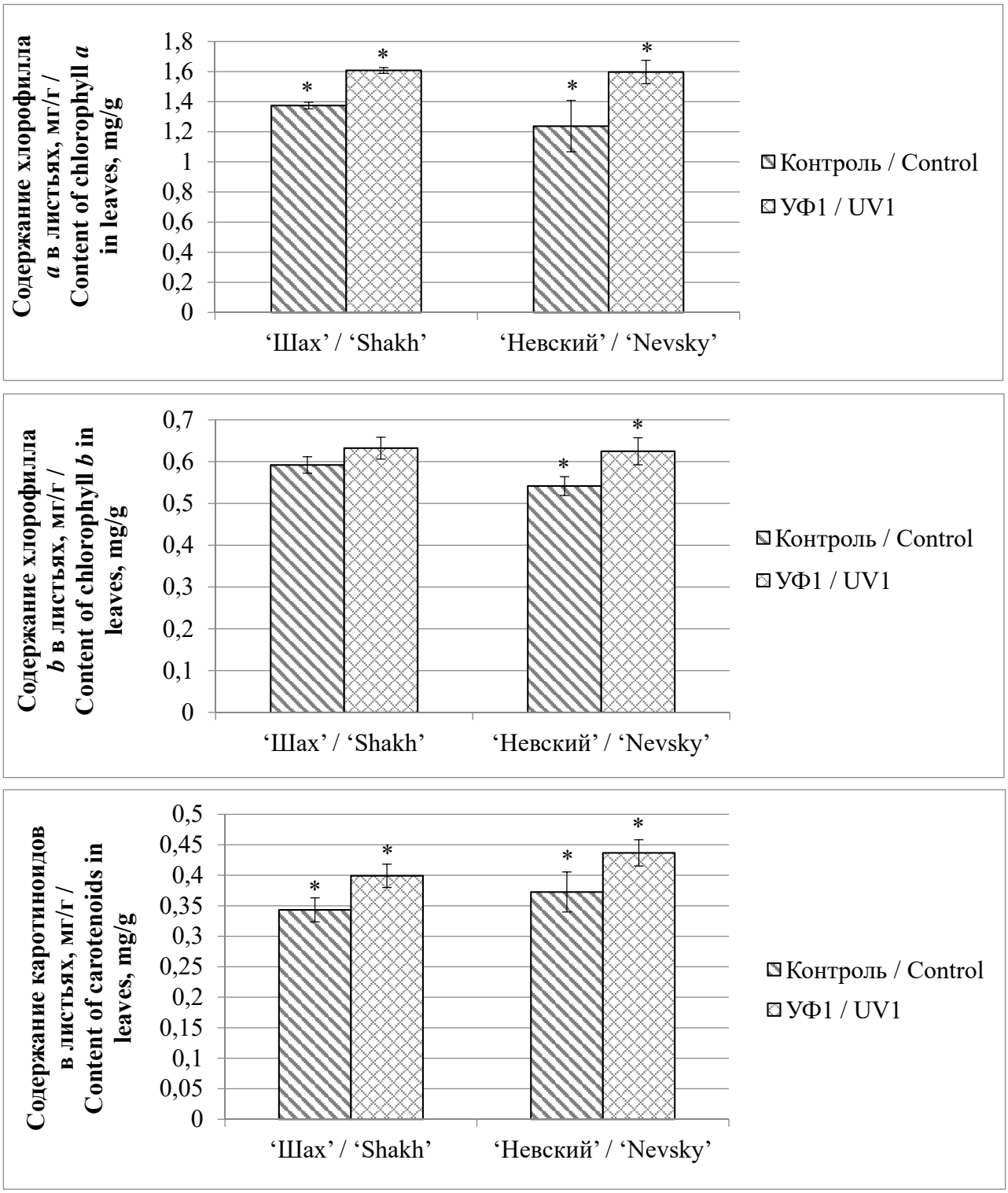


Рис. 1. Содержание фотосинтетических пигментов на 10-й день эксперимента
(* – значимые различия между вариантами опыта)

Fig. 1. Content of photosynthetic pigments on the 10th day of the experiment
(* – significant differences between the experiment variants)

На 20-е сутки эксперимента растения сорта ‘Шах’ продемонстрировали аналогичную динамику, при этом экспериментальный вариант УФ2 существенно отличался от контрольной группы и варианта УФ1 (рис. 2). В то же время растения сорта ‘Невский’ проявили противоположную реакцию, что может свидетельствовать о наличии сортовых специфических характеристик, влияющих на способность адаптироваться к воздействию ультрафиолетового излучения. Эти результаты подчеркивают важность учета различий в реакциях между сортами, а также их уникальных адаптивных механизмов в ответ на различные условия облучения.

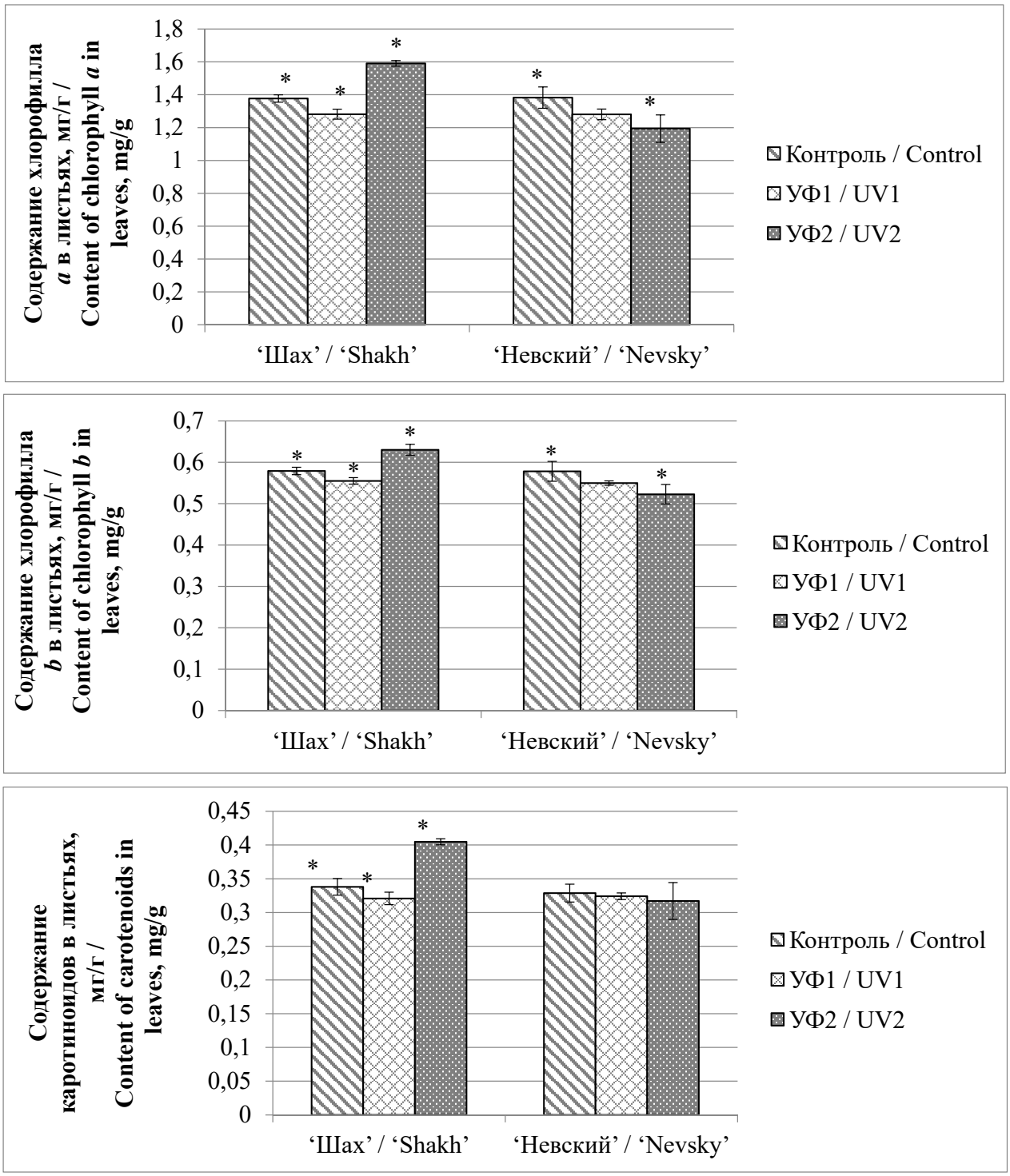


Рис. 2. Содержание фотосинтетических пигментов на 20-й день эксперимента
(* – значимые различия между вариантами опыта)

Fig. 2. Content of photosynthetic pigments on the 20th day of the experiment
(* – significant differences between the experiment variants)

На 30-е и 40-е сутки эксперимента у растений, подвергавшихся дополнительному облучению, наблюдалось снижение уровня всех фотосинтетических пигментов. Это, вероятно, указывает на перестройку светособирающего комплекса и адаптацию хлоропластов к условиям окислительного стресса.

На рисунке 3 представлены данные, полученные на 50-е сутки эксперимента, которые показывают, что растения обоих сортов сохраняют достаточно высокое содержание фотосинтетических пигментов даже в условиях ультрафиолетового облучения вариантом УФ2. Эти результаты подчеркивают устойчивость растений исследуемых сортов к стрессовым факторам, а также их способность адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды.

Это наблюдение свидетельствует о том, что оба сорта способны эффективно адаптироваться к данному уровню ультрафиолетового воздействия, что в свою очередь

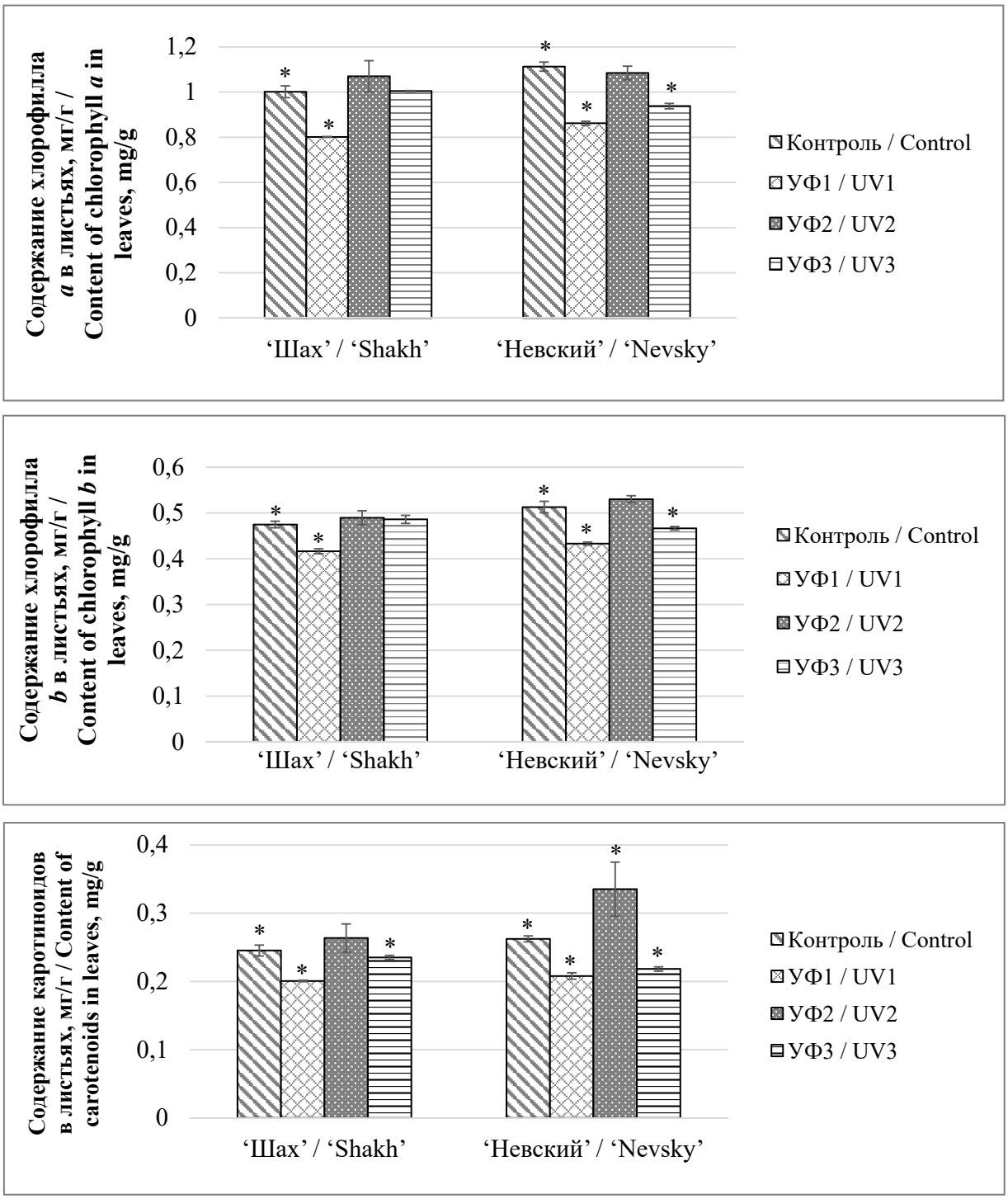


Рис. 3. Содержание фотосинтетических пигментов на 50-й день эксперимента
(* – значимые различия между вариантами опыта)

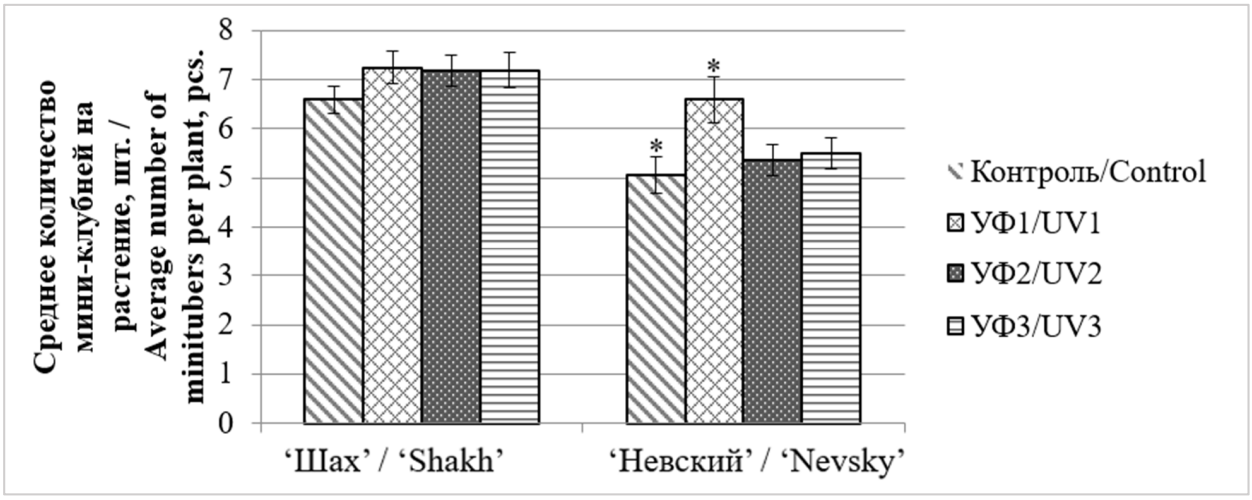
Fig. 3. Content of photosynthetic pigments on the 50th day of the experiment
(* – significant differences between the experiment variants)

может положительно сказаться на их фотосинтетической активности.

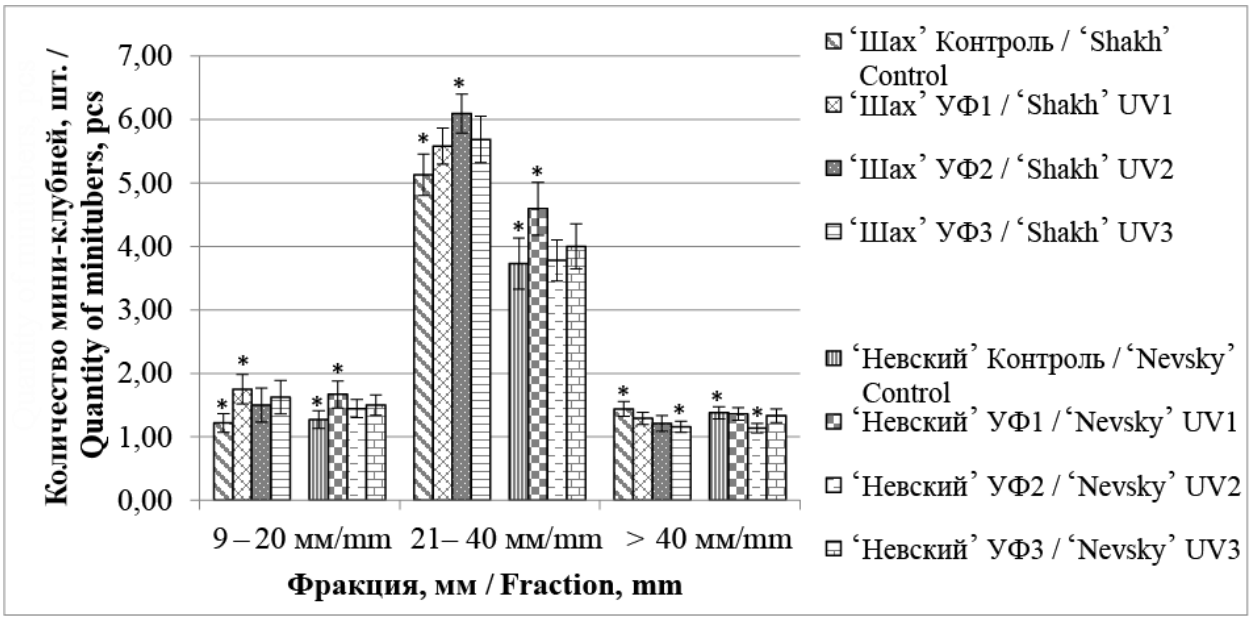
При наименьшем содержании фотосинтетических пигментов у растений сорта ‘Невский’ отмечено статистически достоверное увеличение количества мини-клубней на растение в варианте УФ1 по сравнению с контролем (6,59 шт. и 5,06 шт. соответственно) (рис. 4), что может свидетельствовать о том, что один из механизмов адаптации растений картофеля к УФ-облучению осуществляется за счет снижения суммарного содержания фотосинтетических пигментов.

По общему количеству мини-клубней отмечена тенденция увеличения их количества при дополнительном УФ-А-облучении у картофеля обоих сортов (табл. 2).

При дополнительном воздействии УФ-А-облучения на растения картофеля отмечалось достоверное уменьшение средней массы мини-клубней фракции 21–40 мм у сортов ‘Шах’ и ‘Невский’ в вариантах освещения УФ2



a



b

Рис. 4. Количество мини-клубней сортов ‘Шах’ и ‘Невский’: а – среднее количество на растение, шт.; **b** – количество мини-клубней на растение во фракциях (* – значимые различия между вариантами опыта)

Fig. 4. Number of minitubers in cvs. ‘Shakh’ and ‘Nevsky’: **a** – average number of minitubers per plant, pcs.; **b –** number of minitubers per plant within the fractions (* – significant differences between the experiment variants)

Таблица 2. Общее количество мини-клубней на вариант опыта (в варианте 32 растения), шт.

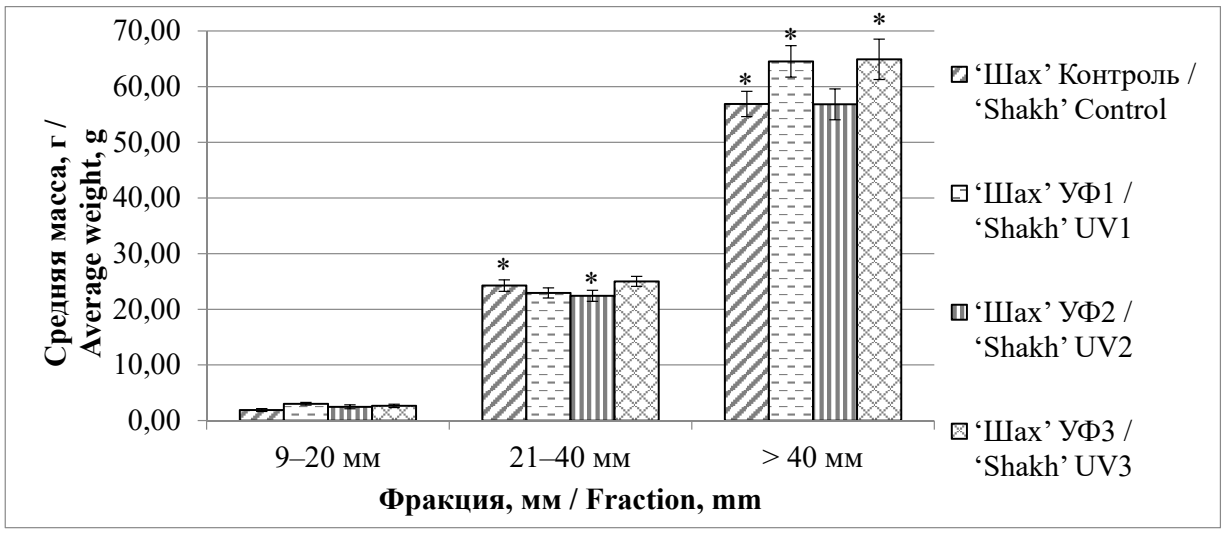
Table 2. Total number of minitubers per variant (with 32 plants in each variant), pcs.

Сорт / Cultivar	Контроль / Control	УФ1 / UV1	УФ2 / UV2	УФ3 / UV3
‘Шах’ / ‘Shakh’	211	232	230	230
‘Невский’ / ‘Nevsky’	162	210	172	176

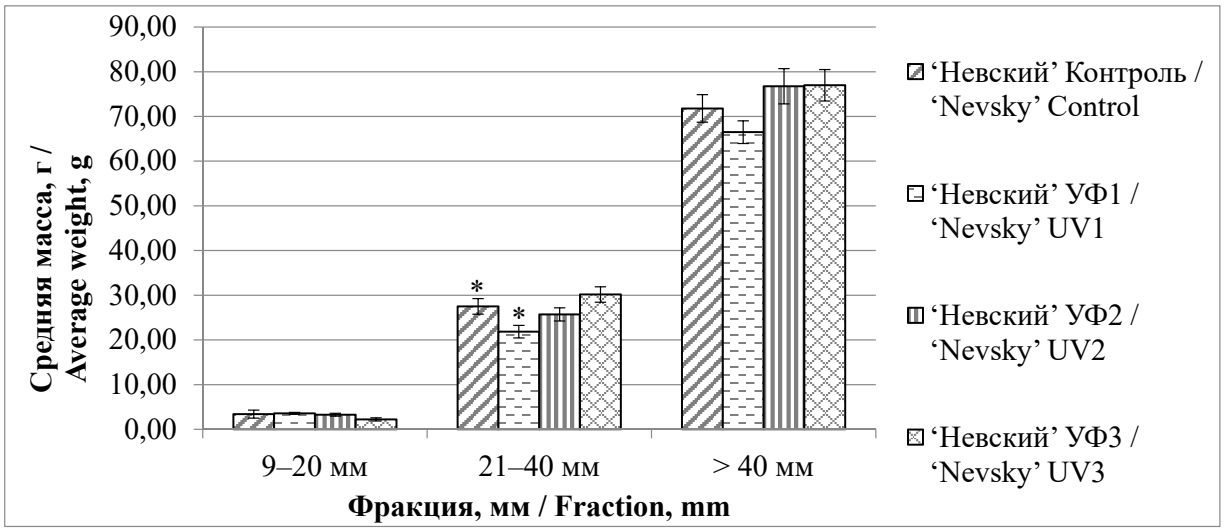
и УФ1 соответственно (рис. 5). У сорта ‘Невский’ в варианте облучения УФ1 произошло уменьшение средней массы мини-клубней на 10%, в то время как количество мини-клубней возросло на 30% (табл. 3).

Такое уменьшение массы клубней в условиях дополнительного УФ-облучения по сравнению с контрольной группой может указывать на перераспределение ресурсов внутри растения. В данном случае растения, подвергшиеся дополнительному воздействию ультрафиолетовых лучей, могут сосредоточивать свою энергию не на увеличении массы клубней, а на формировании большего их количества, что желательно на этом этапе семеноводства.

Основными компонентами, содержащимися в клубнях картофеля, являются крахмал, сахара, клетчатка, азотистые соединения, жиры и зольные элементы (Serderov et al., 2019; Shanina et al., 2024). Содержание этих веществ может значительно варьировать в зависимости от множества факторов. Во-первых, сортовые характеристики картофеля играют ключевую роль, определяя генетиче-



a



b

Рис. 5. Средняя масса мини-клубней, г: a – сорт ‘Шах’; **b** – сорт ‘Невский’
(* – значимые различия между вариантами опыта)

Fig. 5. Average weight of minitubers, g: a – cv. ‘Shakh’; **b** – cv. ‘Nevsky’
(* – significant differences between variants of the experiment)

скую предрасположенность к накоплению определенных веществ. Во-вторых, условия выращивания, включая тип субстрата, уровень удобрений, режим полива и агротехнические приемы, а также, что особенно важно, освещение, оказывают значительное влияние на биохимический состав клубней. Это связано с тем, что картофель является светолюбивым растением и недостаток света может негативно сказаться на его развитии и накоплении питательных веществ (Serderov et al., 2019; Qi et al., 2020).

В рамках исследования проанализировано содержание сухой массы, крахмала и сахаров в мини-клубнях картофеля. Результаты этих исследований представлены в таблице 4.

Наибольшее содержание сухого вещества в мини-клубнях наблюдается при 10-суточной УФ-досветке у сорта ‘Шах’ – 25,15%. Отмечена тенденция его увеличения по сравнению с контрольным вариантом на 9,4%. Аналогичные результаты наблюдали у растений сорта ‘Невский’. В вариантах УФ1 и УФ3 увеличение содержания сухого вещества по сравнению с контрольным вариантом составило 10,1% и 10,8% соответственно.

Основную часть сухого вещества клубня картофеля составляют углеводы, которые играют ключевую роль в его биологии и определяют питательную ценность. Углеводы являются главным продуктом фотосинтеза, обеспечивая растения необходимой энергией для роста и развития. Они служат основным субстратом для дыхательных процессов, а также выступают в качестве формы запасания и транспортировки углерода в растении (Sergeeva et al., 2022; Ahmad et al., 2024).

Углеводы способствуют повышению устойчивости картофеля к низким температурам и другим неблагоприятным условиям окружающей среды. Эти вещества также являются важными показателями продуктивности картофеля, так как их содержание напрямую влияет на урожайность и качество клубней. В клубне картофеля углеводы в основном представлены в форме крахмала (Voronkova, 2012; Kurdziel et al., 2022).

Содержание крахмала в мини-клубнях обоих сортов картофеля было достаточно высоким. При досветке 30 суток (УФ3) зафиксировано значимое увеличение содержания крахмала до 19,45% у мини-клубней сорта

Таблица 3. **Средняя масса общего количества мини-клубней на вариант опыта (в варианте опыта 32 растения), г**

Table 3. **Average weight of the total number of minitubers per variant (with 32 plants in each variant), g**

Сорт / Cultivar	Контроль / Control	УФ1 / UV1	УФ2 / UV2	УФ3 / UV3
‘Шах’ / ‘Shakh’	27,68	30,16	27,24	30,86
‘Невский’ / ‘Nevsky’	34,23	30,63	35,24	36,45

Таблица 4. **Содержание сухого вещества, крахмала и общего сахара в мини-клубнях, %**

Table 4. **Content of dry matter, starch, and total sugars in minitubers, %**

Сорт / Cultivar	Вариант / Variant	Сухое вещество / Dry matter	Крахмал / Starch	Общий сахар / Total sugars
‘Шах’ / ‘Shakh’	Контроль / Control	22,98 ± 3,25	17,39 ± 1,02	0,6 ± 0,12
	УФ1/UV1	25,15 ± 2,14	16,56 ± 0,87	0,9 ± 0,25
	УФ2/UV2	23,07 ± 2,56	17,33 ± 0,59	0,7 ± 0,10
	УФ3/UV3	21,36 ± 2,34	19,45 ± 0,98*	1,1 ± 0,19*
‘Невский’ / ‘Nevsky’	Контроль / Control	19,58 ± 2,81	16,59 ± 0,85	0,8 ± 0,27
	УФ1/UV1	21,56 ± 1,67	16,87 ± 0,50	0,6 ± 0,16
	УФ2/UV2	19,77 ± 2,09	16,55 ± 0,73	1,1 ± 0,19
	УФ3/UV3	21,69 ± 1,48	15,19 ± 0,69	1,3± 0,20*

Примечание: * – значимые различия между вариантом опыта и контрольным вариантом

Note: * – significant differences between the experiment and the control variants

‘Шах’. В мини-клубнях сорта ‘Невский’ статистических значимых различий по содержанию крахмала между вариантами опыта не выявлено.

При использовании варианта УФ3 в мини-клубнях обоих исследованных сортов происходило увеличение содержания сахаров по сравнению с контролем на 0,5%. Фотосинтетические процессы и накопление сахаров взаимосвязаны. Сахара служат основным источником энергии для растений, обеспечивая необходимые условия для процессов фотосинтеза и дыхания. В частности, глюкоза и фруктоза, являясь простыми сахарами, используются в качестве субстратов для синтеза более сложных углеводов, таких как крахмал, который накапливается в клубнях и служит запасом питательных веществ (Haider et al., 2023; Fleming, Morris, 2024).

Дисперсионный анализ полученных данных позволил сделать выводы о величине вклада в общую изменчивость изучаемых показателей фактора досветки УФ-А и фактора генотипа (сорта), а также их совместном вкладе (табл. 5).

Таблица 5. **Оценка вклада исследуемых факторов в общую изменчивость изучаемых показателей, %**

Table 5. **Evaluation of the contribution of the studied factors to the total variability of the examined indicators, %**

Факторы / Factors	Исследуемый показатель / Indicator examined				
	Количество мини-клубней на одно растение / Number of minitubers per plant	Средняя масса мини-клубней / Average weight of minitubers	Общий сахар / Total sugars	Содержание крахмала / Starch content	Содержание хлорофиллов / Chlorophyll content
Фактор наследственности (генотип, сорт) / Genetic factor (genotype, cultivar)	40,2	15,2	17,8	35,8	21,1
Фактор освещения / Radiation factor	25,0	33,6	12,7	3,5	12,2
Взаимодействие факторов / Interaction of factors	5,1	12,4	56,5	55,8	43,7
Прочие факторы / Other factors	29,7	38,7	13,0	4,9	22,9

Взаимодействие факторов освещения и генотипа наиболее значимо для показателей содержания общего сахара, крахмала и хлорофиллов. На количество сформированных мини-клубней влияет преимущественно фактор наследственности (генотип / сорт). На среднюю массу мини-клубней влияют многие прочие факторы, но фактор УФ-А-досветки вносит существенный вклад.

Заключение

УФ-А-облучение способно активировать фотосинтетические процессы, что в свою очередь приводит к увеличению содержания хлорофилла и каротиноидов в растениях. УФ-А-облучение может способствовать увеличению количества мини-клубней, при этом возможно снижение их массы. У растений сорта 'Невский' общее количество мини-клубней увеличилось на 30% при использовании варианта УФ1, в то время как средняя масса клубней снизилась на 10%. Это может указывать на то, что УФ-А-облучение стимулирует клубнеобразование, но при этом может привести к уменьшению среднего размера клубня, что требует дальнейшего изучения механизмов, лежащих в основе этих изменений. Учитывая, что при получении семенного посадочного материала важно именно количество сформированных мини-клубней, то УФ-А-досветка может быть рекомендована для использования в производстве мини-клубней в пленочных теплицах, покровные материалы которых задерживают УФ-А.

Кроме того, УФ-А-облучение может оказывать влияние на углеводный метаболизм, что способствует повышению уровня сахаров и крахмала в клубнях картофеля. Содержание крахмала в мини-клубнях обоих сортов было высоким, при этом наибольшие значения отмечены при дополнительном УФ-А-облучении в течение 30 суток. Это указывает на то, что УФ-А-облучение может не только повышать количество клубней, но и улучшать их качественные характеристики, что является важным аспектом для селекции и агрономической практики.

Влияние фактора УФ-А-облучения для культивирования растений картофеля *in vitro* является значимым фактором для некоторых показателей: средняя масса мини-клубней, количество мини-клубней на одно растение. Для показателей содержания общего сахара, крахмала и хлорофиллов играет большую роль взаимодействие фактора УФ-А-облучения и особенностей генотипа (сорта).

Таким образом, результаты наших исследований подчеркивают потенциал использования УФ-А-облучения как эффективного технологического приема, способствующего повышению как количественных, так и качественных показателей клубней картофеля. Однако для оптимизации этого процесса и минимизации негативных эффектов, таких как снижение массы клубня, необходимы дальнейшие исследования, направленные на изучение различных режимов облучения и их влияния на конкретные сорта картофеля.

References / Литература

Ahmad D., Ying Y., Bao J. Understanding starch biosynthesis in potatoes for metabolic engineering to improve starch quality: A detailed review. *Carbohydrate Polymers*. 2024;15(346):122592. DOI: 10.1016/j.carbpol.2024.122592

Akkamis M., Caliskan S. Effects of different irrigation levels and nitrogen fertilization on some physiological indicators of potato. *Potato Research.* 2024;67:815-831. DOI: 10.1007/s11540-023-09668-y

Fleming S.A., Morris J.R. Perspective: potatoes, quality carbohydrates, and dietary patterns. *Advances in Nutrition*. 2024;15(1):100138. DOI: 10.1016/j.advnut.2023.10.010

Gervais T., Creelman A., Li X.Q., Bizimungu B., De Koeyer D., Dahal K. Potato response to drought stress: physiological and growth basis. *Frontiers in Plant Science*. 2021;12:698060. DOI: 10.3389/fpls.2021.698060

Golovko T.K., Silina E.V., Lashmanova E.A., Kozlovskaya A.V. Reactive oxygen species and antioxidants in living systems: an integrated overview. *Theoretical and Applied Ecology*. 2022;(1):17-26. [in Russian] (Головко Т.К., Силина Е.В., Лашманова Е.А., Козловская А.В. Активные формы кислорода и антиоксиданты в живых системах: интегрирующий обзор. *Теоретическая и прикладная экология*. 2022;(1):17-26). DOI: 10.25750/1995-4301-2022-1-017-026

GOST 26176-2019. Interstate standard. Fodders, mixed feeds. Methods for determination of soluble and hydrolysable carbohydrates. Moscow: Standartinform; 2020. [in Russian] (ГОСТ 26176-2019. Межгосударственный стандарт. Корма, комбикорма. Методы определения растворимых и легкогидрализуемых углеводов. Москва: Стандартинформ; 2020). URL: https://internet-law.ru/gosts/gost/71328/ [дата обращения: 23.12.2024].

GOST 27894.4-88. State standard of the USSR. Peat and products of its processing for agriculture. Methods for determination of nitrate nitrogen. Moscow; 1989. [in Russian] (ГОСТ 27894.4-88. Государственный стандарт Союза ССР. Торф и продукты его переработки для сельского хозяйства. Методы определения нитратного азота. Москва; 1989). URL: https://meganorm.ru/Data2/1/4294826/4294826848.pdf [дата обращения: 23.12.2024].

GOST 27894.5-88. State standard of the USSR. Peat and products of its processing for agriculture. Methods for determination of mobile forms of phosphorus. Moscow; 1989. [in Russian] (ГОСТ 27894.5-88. Государственный стандарт Союза ССР. Торф и продукты его переработки для сельского хозяйства. Методы определения подвижных форм фосфора. Москва; 1989). URL: https://meganorm.ru/Index/11/11448.htm [дата обращения: 23.12.2024].

GOST 27894.6-88. State standard of the USSR. Peat and products of its processing for agriculture. Method for determination of mobile forms of potassium. Moscow; 1989. [in Russian] (ГОСТ 27894.6-88. Государственный стандарт Союза ССР. Торф и продукты его переработки для сельского хозяйства. Метод определения подвижных форм калия. Москва; 1989). URL: https://meganorm.ru/Index2/1/4294826/4294826846.htm [дата обращения: 23.12.2024].

GOST 33977-2016. Interstate standard. Fruit and vegetable products. Methods for determination of total solids content. Moscow: Standartinform; 2019. [in Russian] (ГОСТ 33977-2016. Межгосударственный стандарт. Продукты переработки фруктов и овощей. Методы определения общего содержания сухих веществ. Москва: Стандартинформ; 2019). URL: https://internet-law.ru/gosts/gost/64328/ [дата обращения: 23.12.2024].

GOST 33996-2016. Interstate standard. Seed potatoes. Specifications and methods of determining the quality. Moscow: Standartinform; 2020. [in Russian] (ГОСТ 33996-2016. Межгосударственный стандарт. Картофель семенной. Технические условия и методы определения качества. Москва: Стандартинформ; 2020). URL: https://docs.cntd.ru/document/1200143601 [дата обращения: 23.12.2024].

Haider M.W., Nafees M., Iqbal R., Asad H.U., Azeem F., Shaheen G. et al. Postharvest starch and sugars adjustment in potato tubers of wide-ranging dormancy genotypes subjected to various sprout forcing techniques. *Scientific Reports*. 2023;13(1):14845. DOI: 10.1038/s41598-023-37711-y

Kolodina E.V., Chirkova V.Yu., Sharlaeva E.A. Influence of ultraviolet radiation on the content of photosynthetic pigments in lettuce leaves (Vliyaniye ultrafioletovogo izlucheniya na soderzhaniye fotosinteticheskikh pigmentov v listyakh salata). *Trudy molodykh uchenykh Altayskogo gosudarstvennogo universiteta = Transactions by Young Scientists of Altai State University*. 2021;(18):8-10. [in Russian] (Колодина Е.В., Чиркова В.Ю., Шарлаева Е.А. Влияние ультрафиолетового излучения на содержание фотосинтетических пигментов в листьях салата. *Труды молодых ученых Алтайского государственного университета*. 2021;(18):8-10).

Kurdziel M., Łabanowska M., Pietrzyk S., Pająk P., Królikowska K., Szwengiel A. The effect of UV-B irradiation on structural and functional properties of corn and potato starches and their components. *Carbohydrate Polymers*. 2022;289:119439. DOI: 10.1016/j.carbpol.2022.119439

Nikonovich T.V., Kardis T.V., Kilchevsky A.V., Filipenya V.L., Chizhik O.V., Trofimov Yu.V. et al. Analysis of varietal differences in regenerated potato plants *in vitro* using LED lamps (Analiz sortovykh razlichiy rasteniy-regenerantov kartofelya *in vitro* pri ispolzovanii svetodiodnykh svetilnikov). *Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy*. 2018;(1):73-78. [in Russian] (Никонович Т.В., Кардис Т.В., Кильчевский А.В., Филипеня В.Л., Чижик О.В., Трофимов Ю.В. и др. Анализ сортовых различий растений-регенерантов картофеля *in vitro* при использовании светодиодных светильников. *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. 2018;(1):73-78).

Pradedova E.V., Isheeva O.D., Salyaev R.K. Classification of the antioxidant defense system as the ground for reasonable organization of experimental studies of the oxidative stress in plants. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2011;58(2):210-217. DOI: 10.1134/S1021443711020166

Qi W., Ma J., Zhang J., Gui M., Li J., Zhang L. Effects of low doses of UV-B radiation supplementation on tuber quality in purple potato (*Solanum tuberosum* L.). *Plant Signaling and Behavior*. 2020;15(9):1783490. DOI: 10.1080/15592324.2020.1783490

Rozentsvet O.A., Bogdanova E.S., Bakunov A.L., Sablina N.A., Rubtsov S.L., Mielekhin A.V. Dynamics of yield, tuber quality and parameters of the photosynthetic apparatus during long-term reproduction of potato varieties. *Zemledelie = Crop Farming*. 2024;(8):31-35. [in Russian] (Розенцвет О.А., Богданова Е.С., Бакунов А.Л., Саблина Н.А., Рубцов С.Л., Милехин А.В. Динамика урожайности, качества клубней и параметров фотосинтетического аппарата при длительном репродуцировании сорта картофеля. *Земледелие*. 2024(8):31-35). DOI: 10.24412/0044-3913-2024-8-31-35

Sayapova M. G., Karpukhin M.Yu., Keyta F. Potato seed production (Semenovodstvo kartofelya). *Youth and Science*. 2018;(7):54. [in Russian] (Саяпова М. Г., Карпухин М.Г., Кейта Ф. Семеноводство картофеля. *Молодежь и наука*. 2018;(7):54).

Serderov V.K., Chanbabaev T.G., Serderova D.V. Change of maintenance of dry substances and starch in tubers of potato in dependence on terms of till. *Vegetable Crops of Russia*. 2019;(2):80-83. [in Russian] (Сердеров В.К., Ханбабаев Т.Г., Сердерова Д.В. Изменение содержания сухого вещества и крахмала в клубнях картофеля в зависимости от условий возделывания. *Овощи России*. 2019;(2):80-83). DOI: 10.18619/2072-9146-2019-2-80-83

Sergeeva E.M., Larichev K.T., Salina E.A., Kochetov A.V. Starch metabolism in potato *Solanum tuberosum* L. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2022;26(3):250-263. DOI: 10.18699/ VJGB-22-32

Shanina E.P., Oberiukhtin D.A., Chernitskiy A.E. Potato juice vs. traditional potato use – A new insight (review). *Agricultural Biology*. 2024;59(1):22-38. DOI: 10.15389/agrobiology.2024.1.22eng

Smirnova Yu.D., Podolian E.A. Techniques for increasing the efficiency of microclonal propagation of potatoes (review). *Agricultural Science Euro-North-East*. 2024;25(3):319-329. [in Russian] (Смирнова Ю.Д., Подолян Е.А. Приемы повышения эффективности микроклонального размножения картофеля (обзор). *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2024;25(3):319-329). DOI: 10.30766/2072-9081.2024.25.3.319-329

Solovchenko A.E., Merzlyak M.N. Screening of visible and UV radiation as a photoprotective mechanism in plants. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2008;55(6):719-737. DOI: 10.1134/S1021443708060010

Theeuwen T.P.J.M., Logie L.L., Harbinson J., Aarts M.G.M. Genetics as a key to improving crop photosynthesis. *Journal of Experimental Botany*. 2022;73(10):3122-3137. DOI: 10.1093/jxb/erac076

Voronkova M.V. Protein-carbohydrate complex of potato tubers. *Scientific Notes of Orel State University. Series: Natural, Technical and Medical Sciences*. 2012;(6-1):373-377. [in Russian] (Воронкова М.В. Белково-углеводный комплекс клубней картофеля. *Ученые записки Орловского государственного университета. Серия: Естественные, технические и медицинские науки*. 2012;(6-1):373-377).

Wintermans J.E.G., de Mots A. Spectrophotometric characteristics of chlorophyll *a* and *b* and their phaeophytins in ethanol. *Biochimica et Biophysica Acta*. 1965;109(2):448-453. DOI: 10.1016/0926-6585(65)90170-6

Информация об авторах

София Вячеславовна Щербёнок, младший научный сотрудник, Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН, 614532 Россия, Пермский край, с. Лобаново, ул. Культуры, 12, аспирант, Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова, 614990 Россия, Пермь, ул. Петропавловская, 23, sshcherbenok@bk.ru, https://orcid.org/0009-0002-9610-6207

Татьяна Николаевна Лисина, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, заведующая лабораторией, Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал Пермского федерального исследовательского

центра УрО РАН, 614532 Россия, Пермский край, с. Лобаново, ул. Культуры, 12, pniish@rambler.ru, https://orcid.org/0009-0002-0316-0010

Сергей Леонидович Елисеев, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова, 614990 Россия, Пермь, ул. Петропавловская, 23, info@pgatu.ru, https://orcid.org/0000-0001-8990-7407

Дмитрий Юрьевич Каракайтис, младший научный сотрудник, Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН, 614532 Россия, Пермский край, с. Лобаново, ул. Культуры, 12, pniish@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-3858-2419

Information about the authors

Sofya V. Shcherbyonok, Associate Researcher, Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm Research Institute of Agriculture – division of Perm Federal Research Center, UrB RAS, 12 Kultury St., Lobanovo, Perm Territory 614532, Russia, Postgraduate Student, Perm State Agro-Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov, 23 Petropavlovskaya St., Perm 614990, Russia, sshcherbenok@bk.ru, https://orcid.org/0009-0002-9610-6207

Tatyana N. Lisina, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Head of a Laboratory, Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm Research Institute of Agriculture – division of Perm Federal Research Center, UrB RAS, 12 Kultury St., Lobanovo, Perm Territory 614532, Russia, pniish@rambler.ru, https://orcid.org/0009-0002-0316-0010

Sergey L. Eliseev, Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Perm State Agro-Technological University named after Academician D.N. Pryanishnikov, 23 Petropavlovskaya St., Perm 614990, Russia, info@pgatu.ru, https://orcid.org/0000-0001-8990-7407

Dmitriy J. Karakajtis, Associate Researcher, Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm Research Institute of Agriculture – division of Perm Federal Research Center, UrB RAS, 12 Kultury St., Lobanovo, Perm Territory 614532, Russia, pniish@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-3858-2419

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 01.03.2025; одобрена после рецензирования 02.06.2025; принята к публикации 18.07.2025.
The article was submitted on 01.03.2025; approved after reviewing on 02.06.2025; accepted for publication on 18.07.2025.

КОЛЛЕКЦИИ МИРОВЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СЕЛЕКЦИИ

Научная статья
УДК 633.37:631.527
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-163-172

CC BY

Селекционный потенциал образцов гуара из коллекции ВИР при оценке в условиях Российской Федерации

М. А. Вишнякова[1], Р. А. Шаухаров[2], Н. В. Кочерина[1], С. Б. Архимандритова[1], Е. А. Дзюбенко[1]

[1] Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия

[2] Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Волгоградская опытная станция – филиал ВИР, Краснослободск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Маргарита Афанасьевна Вишнякова, m.vishnyakova.vir@gmail.com

Актуальность. Гуар (*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.) – зернобобовое культурное растение тропического происхождения, получившее в последние годы беспрецедентную популярность благодаря наличию в его семенах камеди. Использование гуаровой камеди в добыче нефти и газа придает культуре стратегическое значение. Это послужило поводом для его интродукции в Российскую Федерацию (РФ) в начале XXI века и активной селекции отечественных сортов. Востребованность коллекции гуара резко возросла, что послужило импульсом для ее активного изучения.
Материалы и методы. Объектом исследования послужили выборки из коллекции гуара ВИР: 50 образцов в 2023 г. и 30 наиболее продуктивных из них в 2024 г. На Волгоградской опытной станции ВИР проводили фенотипирование образцов по 13 селекционно значимым признакам. Признак скороспелости определяли косвенными методами. Статистическую обработку результатов исследований выполняли с использование пакета программ Statistica 13.3.
Результаты. Проведен анализ семенной продуктивности гуара – ее структуры и взаимосвязей определяющих ее признаков. Определены наиболее продуктивные образцы. На основе анализа ранее полученные данных об отношении образцов коллекции гуара к фотопериоду предложен модифицированный алгоритм определения фотопериодической чувствительности образцов как косвенного показателя их скороспелости.
Заключение. Полученные данные об образцах коллекции гермоплазмы гуара ВИР при изучении в условиях РФ позволят результативно использовать ее в качестве исходного материала для создания отечественных сортов.

Ключевые слова: гуар, коллекция, интродукция, фенотипирование, изменчивость, селекция, камедь

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта 23-16-00195 от 15 мая 2023 г.
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Вишнякова М.А., Шаухаров Р.А., Кочерина Н.В., Архимандритова С.Б., Дзюбенко Е.А. Селекционный потенциал образцов гуара из коллекции ВИР при оценке в условиях Российской Федерации. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(3):163-172. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-163-172

© Вишнякова М.А., Шаухаров Р.А., Кочерина Н.В., Архимандритова С.Б., Дзюбенко Е.А., 2025

COLLECTIONS OF THE WORLD'S CROP GENETIC RESOURCES FOR THE DEVELOPMENT OF PRIORITY PLANT BREEDING TRENDS

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-163-172

Breeding potential of guar accessions from the VIR collection evaluated under the conditions of the Russian Federation

Margarita A. Vishnyakova[1], Ramazan A. Shaukharov[2], Natalia V. Kocherina[1], Serafima B. Arkhimandritova[1], Elena A. Dzyubenko[1]

[1] N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia;

[2] N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Volgograd Experiment Station – branch of VIR, Krasnoslobodsk, Russia

Corresponding author: Margarita A. Vishnyakova, m.vishnyakova.vir@gmail.com

Background. Guar (*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.) is a leguminous crop plant of tropical origin that has gained unprecedented popularity in recent years due to the presence of gum in its seeds. The use of guar gum in the oil and gas industry gives the crop strategic importance. This was the reason for its introduction to the Russian Federation (RF) at the beginning of the 21st century and for the active breeding of domestic cultivars. The demand for the guar collection has increased dramatically, serving as an impetus for its active study.
Materials and methods. The materials of the study were guar accessions from the VIR collection: 50 accessions in 2023, and 30 most productive of them in 2024. The accessions were phenotyped for 13 traits important for breeding at Volgograd Experiment Station of VIR. The indicator of early maturity was assessed by indirect methods. Statistical processing of the research results was performed using the Statistica 13.3 software package.
Results. Seed productivity of guar accessions was analyzed, its structure and interrelations among its defining characteristics. Differentiation of the guar gene pool for the studied traits was revealed. The most productive accessions were identified. Previously obtained data on the relationship of guar collection accessions to the photoperiod served as a basis for proposing a modified algorithm for determining the photoperiod sensitivity of accessions as an indirect indicator of their earliness.
Conclusion. The data obtained for guar accessions from the VIR collection under the conditions of the Russian Federation will make it possible to use this germplasm effectively as source material for breeding domestic cultivars.

Keywords: guar, collection, introduction, phenotyping, variability, breeding, gum

Acknowledgements: this research was funded by the Russian Science Foundation (Project No. 23-16-00195 of May 15, 2023). The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Vishnyakova M.A., Shaukharov R.A., Kocherina N.V., Arkhimandritova S.B., Dzyubenko E.A. Breeding potential of guar accessions from the VIR collection evaluated under the conditions of the Russian Federation. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(3):163-172. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-163-172

Введение

Гуар (*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.) – представитель сем. Fabaceae Lindl. Это однолетнее культурное самоопыляющееся растение в местах происхождения и традиционного выращивания в Индии и Пакистане в течение столетий использовали как кормовое и отчасти употребляемое в пищу (Thombare et al., 2016). Однако оказалось, что культурное растение гуар, как многие зернобобовые культуры, к которым он относится, имеет многофункциональное значение и может быть использован во многих отраслях народного хозяйства. Это определяется камедью гуара – полисахаридом галактоманнаном, содержащимся в эндосперме семян растения. Открытие прикладного значения гуаровой камеди было сделано в Университете штата Аризоны в середине XX века. Был продемонстрирован ее широкий потенциал для различных отраслей народного хозяйства и рекомендована масштабная интродукция гуара в США в качестве промышленной сельскохозяйственной культуры (Whistler, 1948; Whistler, Hymowitz, 1979). В наши дни гуаровая камедь, благодаря уникальным свойствам своих водных растворов и отсутствию токсичности, известна как самый эффективный натуральный загуститель, используемый в пищу. Широкое применение она находит также в медицине и косметологической промышленности. Но стратегическое значение культуре придает использование камеди в нефте- и газодобыче для повышения нефтеотдачи, гидроразрыва пласта и для улучшения вязкости бурового раствора (Kuravadi et al., 2013; Sindhuja et al., 2022).

После открытия значения гуаровой камеди для экономики продукция из гуара стала крупнейшей статьей сельскохозяйственного экспорта Индии, которой принадлежит 72–80% мирового производства и поставок гуара на мировой рынок. 15% мирового экспорта поставляет Пакистан и несколько процентов – США (Sindhuja et al., 2022). Наша страна занимает второе место в мире по импорту камеди после США (https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-guar-gum-market/17787).

Популярность гуара значительно расширила агрономический ареал культуры: ее стали выращивать в Южной Африке, Южной Европе, Судане, Австралии, Иране, Шри-Ланке, Китае и Таиланде (Vishnyakova et al., 2025).

В силу понимания стратегической важности гуара в РФ при деятельном участии компании «Газпром Нефть» в 2010-х гг. предприняты попытки интродукции вида из стран южной и юго-западной Азии в некоторые районы Южного федерального округа. На ряде фермерских полей получены небольшие производственные партии семян гуара (Lebed et al., 2017; Voloshin et al., 2019). В те же годы началась селекция отечественных сортов гуара, число которых к настоящему времени достигло 18 (https://gossortrf.ru/registry/gosudarstvennyy-reestr-selektsionnykh-dostizheniy-dopushchennykh-k-ispolzovaniyu-tom-1-sorta-rasteni). Это привлекло внимание к коллекции ВИР как к источнику исходного материала.

Коллекция генетических ресурсов гуара ВИР существует с 1956 г. Многие годы коллекция была не востребована, а гуар в СССР и РФ относили к разряду малораспространенных культур, которые в англоязычной научной литературе называют “underutilizied” (недоиспользованные), “neglected” (заброшенные) и даже “orphan” (сироты). Востребованность коллекции послужила импульсом мобилизации нового материала и инициировала исследования культуры российскими учеными. К настоящему времени накоплен определенный багаж сведений о различных аспектах биологии вида при выращивании образцов гуара из коллекции ВИР в разных географических точках юга европейской части РФ и в теплицах в г. Пушкине (Санкт-Петербург) (Bulyntsev et al., 2017; Kruchina-Bogdanov et al., 2019; Radchenko, Sokolova, 2019; Teplyakova et al., 2019; Dzyubenko, 2021; Vishnyakova et al., 2025).

Цель данной статьи – показать выявленную дифференциацию генофонда гуара из коллекции ВИР по признакам, определяющим селекционный потенциал культуры и оцененным у образцов коллекции, выращенных в условиях РФ – в самых высоких для вида широтах в мире – на Волгоградской опытной станции ВИР.

Материал и методы

Материалом послужили образцы гуара из коллекции ВИР. Их использовали для создания выборок, размеры которых приведены ниже, предназначенных для оценки селекционно значимых признаков.

Методы полевого фенотипирования

Полевое фенотипирование 50 образцов коллекции ВИР в 2023 г. и 30 наиболее продуктивных из них в 2024 г. проводили на Волгоградской опытной станции (ОС) ВИР в г. Краснослободске (48°42’ с. ш., 44°34’ в. д.) по принятым в ВИР методикам (Vishnyakova et al., 2018). Климат региона умеренно континентальный, с умеренно холодной зимой и жарким летом. Почвы – черноземы с аллювиальными суглинками.

Образцы оценивали в поле при контролируемом поливе – 5 л/растение в неделю в 2023 г. и 2,5 л/растение в неделю в 2024 г. Режим полива 2023 г. был оценен нами как избыточный, полив в 2024 г. был принят оптимальным для культуры (Vishnyakova et al., 2025). Поэтому данные о структуре семенной продуктивности приведены для 30 образцов в 2024 г. В выборку вошли 4 сорта российской селекции, 1 сорт из США и образцы разного статуса: 2 из Австралии, по одному из Пакистана и Великобритании, 21 из Индии.

Признаки, по которым был проведен анализ структуры семенной продуктивности (по 6–7 растений каждого образца): длина стебля, см; число ветвей, шт.; число узлов, шт.: а) число узлов с созревшими бобами, б) число узлов с невызревшими бобами; число бобов в узле, шт.; масса зрелых бобов с растения, г; % узлов с вызревшими бобами – отношение числа узлов с созревшими бобами к общему числу узлов; длина боба, см; число семян в бобе, шт.; масса семян с растения, г; масса 1000 семян. Признак «прикрепление нижнего узла» не подвергали статистической обработке. Скороспелость оценивали косвенными методами, для одного из которых нами предложена модификация.

Определение скороспелости образцов

Для выявления скороспелых образцов мы предлагаем косвенные параметры, так как в силу тропического происхождения большинства образцов коллекции гуара продолжительность их вегетационного периода установить невозможно. Для этого выбраны два критерия: вызреваемость – отношение продуктивных узлов с вызревшими бобами к общему числу узлов с завязавшимися бобами. Признак заимствован из методических указаний по арахису (Vakhrusheva, 1995), в которых образцы с показателем выше 69% предложено считать скороспелы-

ми. Для второго показателя – фотопериодической чувствительности – нами предложена модификация принятого в ВИР способа определения этого признака. Использовали данные о реакции гуара на фотопериод для 192 генотипов – потомств растений 41 образца гуара (Teplyakova et al., 2019), полученные ранее за рамками настоящего исследования с участием авторов данной статьи Е. А. Дзюбенко и С. Б. Архимандритовой (Тепляковой). В этой работе (Teplyakova et al., 2019) образцы оценены как рано- и поздноцветущие. Мы предложили ранжировать их в соответствии с коэффициентом фотопериодической чувствительности (Koshkin, 2012), вычисляемым по формуле $К_{фпч}$ = Т1/Т2, где Т1 – число дней от всходов до начала цветения на коротком дне (КД), Т2 – на длинном дне (ДД). Традиционно его определяют на фотопериодической площадке в г. Пушкине (Санкт-Петербург, 59°53’ с. ш.) (Koshkin, 2012), что в данном случае было неприемлемо, так как тепловые ресурсы региона значительно меньше требуемых для гуара. Поэтому предложено за короткий день принять продолжительность фотопериода Кубанской ОС ВИР (Краснодарский край, 45°12’ с. ш.) – в среднем за период изучения 15,4 ч, где эти образцы выращивали в поле рядками по 2 погонных метра, по 50 семян на генотип, а за длинный – продолжительность светового дня в г. Пушкине – 18,2–18,9 ч, где их выращивали в теплице при естественном освещении в сосудах по 8 растений каждого генотипа. Дата посева в обоих регионах – 12 мая 2018 г. Отмечали даты начала цветения (бутонизации), полного цветения. В теплице фиксировали дневные и ночные температуры, температуры на Кубанской ОС ВИР приведены по данным местной метеостанции. Среднесуточная температура в теплице в период цветения раноцветущих генотипов (конец июня – июль) равнялась 25,0°С, с дневным максимумом 35°С, с ночным минимумом 16°С. На Кубанской ОС ВИР в период начала цветения образцов (конец июня – первая половина июля) была аномально жаркая погода: среднесуточная температура воздуха равнялась 25,4°С, что на 2,3°С выше многолетней, с максимумом 38,7°С, с ночным минимумом 15°С.

Статистика. Для всех морфометрических признаков каждого образца определяли средние значения признаков со своей стандартной ошибкой средней $\bar{x} \pm SE$. Для анализа вариабельности выборок определяли коэффициенты вариации и наименьшие существенные разницы $НСР_{0,05}$ с использованием дисперсионного анализа. Для установления характера связи попарно между каждым из количественных признаков растений по каждому варианту высчитывали коэффициенты корреляции *r*, критерием проверки значимости которых являлось отношение *r* к своей ошибке посредством *t*-критерия Стьюдента. В биометрических расчетах считается, что $r < 0,3$ – слабая корреляция, если $r = 0,3–0,69$ – средняя, $r \geq 0,7$ – сильная взаимосвязь признаков.

Результаты и обсуждение

Изменчивость признаков семенной продуктивности. Следует отметить, что в изучаемой выборке, как и в генофонде гуара в целом, отмечается определенное разнообразие морфологических признаков. Систематизация этого разнообразия с большой степенью детализации сделана ранее (Dzyubenko, 2021). Отмечен разный габитус растений, включающий разную степень ветвистости и облиственности, разный характер роста стебля – детерминантный и индетерминантный, разную степень опушенности листьев и бобов, варьирующие размеры и форма боба и др.

В данном исследовании мы приводим анализ оценки образцов коллекции гуара по признакам, наиболее значимым для селекции, в том числе и части перечисленных выше. Данные оценки этих признаков, полученные на Волгоградской ОС ВИР, приведены в таблице 1.

Высота растений. Признак демонстрировал среднюю изменчивость (CV = 13,34%), варьируя от 66,6 до 116,0 см при среднем 92,95 см. Характерно, что при такой значительной высоте не отмечается полегаемости растений за счет очень прочного стебля, имеющего диаметр не менее 1 см.

Ветвистость. По характеру ветвления исследованные образцы делятся на группы: неветвящиеся (условно называемые одностебельными) (рис. 1); равномерно ветвистые (закладка побегов 2-го порядка на всем протяжении основного стебля); базально ветвистые (побеги только в нижней части основного стебля) (см. рис. 1). Последний тип неудобен для механизированной уборки. Отмечено сильное варьирование признака: 0–12,20 при среднем значении 7,0 шт. и CV = 51,72%.

Расположение нижнего боба. Этот признак (данные не приводятся) – одно из самых уязвимых свойств гуара как сельскохозяйственной культуры, препятствующих механизированной уборке, так как нижний боб находится на высоте от 1 до 8 см. Особенно явно этот недостаток проявляется у образцов с базальным ветвлением. У одностебельных образцов расположение нижнего узла с бобами, как правило, более высокое по сравнению с ветвистыми образцами гуара.

Число узлов на растении – сильно варьирующий признак (CV = 40,72). В нашем исследовании его изменчивость у отдельных растений разных образцов определялась в границах 7–48 шт., межсортовая (межпопуляционная) изменчивость варьировала от 16,2 до 39,0 шт., среднее по выборке – 28,18 шт.

Число бобов в узле. Среди зернобобовых культур число бобов в узле (кластере) у гуара – одно из самых высоких. В нашем опыте его минимальное значение было 2,5, максимальное – 6,5, среднее по выборке – 4,24 шт., CV = 25,48%. Определена также дифференциация выборки по числу узлов с вызревшими и невызревшими бобами. Средние по выборке значения для узлов с вызревшими бобами – 15,81, с невызревшими – 10,77. Коэффициенты варьирования у обоих показателей почти равны: 56,01 и 56,15% соответственно.

Вызреваемость (количество узлов с вызревшими бобами по отношению ко всем узлам на растении), %. Признак в нашей выборке имел среднюю степень варьирования – CV = 22,87%. Изменчивость признака находилась в пределах 25,7–95,5% при среднем значении 60,3%.

Масса зрелых бобов с растения варьировала сильно: от 10,40 до 70,80 г при среднем значении 37,46 г. CV = 44.91%.

Длина боба. Бобы вверх стоящие, в зрелом состоянии варьируют по окраске (песочные, серые, черные) и незначительно по длине: от 4,42 до 6,62 см при среднем 5,52 см и CV = 10,89%.

Число семян в бобе. В нашем опыте признак имел среднее варьирование: от 4,80 до 8,20 со средним значением 6,77 шт., CV = 12,24%.

Масса семян с растения – сильно варьирующий признак, в большой степени зависящий от среды. В нашем исследовании размах изменчивости признака был для отдельных растений от 3,0 г до 50,8 г/растение; средних

Таблица 1. Значения признаков структуры семенной продуктивности 30 образцов гуара из коллекции ВИР
(Волгоградская опытная станция ВИР, полив, 2024 г.)

Table 1. Variability of seed productivity structure traits in 30 guar accessions from the VIR collection
(Volgograd Experiment Station of VIR, irrigation, 2024)

Признак	Минимум (№ образца по каталогу ВИР)	Максимум (№ образца по каталогу ВИР)	Среднее	CV, %
Высота растения, см	66,60 ± 1,63 (к-52862)	116,0 ± 2.00 (к-52574)	92,95 ± 2,26	13,34
Число ветвей, шт.	0 (к-52574; 52906)	12,20 ± 1,77 (к-52934)	7,0 ± 0,66	51,72
Число узлов, шт.	16,2 ± 2.31 (к-52574)	39,0 ± 1,55 (к-52891)	28,18 ± 0,88	40,72.
Число бобов/узел, шт.	2,5 ± 0,00 (к-52945)	6,5 ± 0,00 (к-52932)	4,24 ± 0,20	25,48
Узлов со зрелыми бобами, шт.	3,4 ± 0.87 (к- 52920)	30,0 ± 5,36 (к-52929)	15,81 ± 0.72	56,01
Узлов с невызревшими бобами, шт.	1,0 ± 0,45 (к-52938)	23,6 ± 2.29 (к-52932)	10,77 ± 0,49	56,15
Вызреваемость, %	25,73 ± 3,57 (к-52920)	95,5 ± 4,59 (к-52938)	58,9 ± 4.20	22,87
Масса зрелых бобов с растения, г	10,40 ± 0,51 (к-52924)	70,80 ± 20,80 (к-52857)	37,46 ± 3.07	44,91
Длина боба, см	4,42 ± 0,18 (к-52529)	6,62 ± 0,18 (к-52910)	5,52 ± 0,11	10,81
Число семян в бобе, шт.	4,80 ± 0,23 (к-52929	8,20 ± 0,28 (к-52938)	6,77 ± 0,15	12,24
Масса семян с растения, г	3,42 ± 0,23 (к-52924)	30,18 ± 7,69 (к-52860)	16,14 ± 1,41	47,79
Масса 1000 семян, г	37,0 (к-52906)	47,4 (к-52575; 52934)	42,04 ± 0,68	8,81

Рис. 1. Габитус растений гуара из коллекции ВИР: слева – одностебельный неветвящийся сорт ‘Вектор’, РФ (к-52574); справа – базально ветвящийся сорт ‘Kinman’, США (к-52585)

Fig. 1. Habitus of guar plants from the VIR collection: on the left – single-stemmed non-branching cv. ‘Vector’, Russian Federation (к-52574); on the right – basally branching cv. ‘Kinman’, USA (к-52585)

по образцам – от 3,42 до 30,18 г/раст., среднее по выборке – 16,14 г/раст., CV = 47.79%.

Масса 1000 семян – незначительно варьирующий признак (CV = 8,81%). Изменчивость средних значений по образцам – от 37,0 г до 48,2 г при среднем по выборке 42,04 г.

Соответствующие сведения имеются для каждого из изученных образцов, что является основанием для пользователей заказывать материал из коллекции с требуемыми характеристиками. Образцы с минимальным и максимальным значениями признаков приведены в таблице 1.

Наиболее значимый признак для получения камеди – семенная продуктивность растений. В нашей выборке максимальное значение признака – выше 25 г/растение – показали 5 образцов: к-52584 (США), к-52857, к-52860, к-52910, к-52918, к-52935 (Индия).

Проведенный корреляционный анализ взаимосвязей признаков показал следующие достоверные коэффициенты корреляции (табл. 2). Высота растения умеренно взаимосвязана с числом семян в бобе (r = 0,38), которое в свою очередь значимо связано с массой зрелых бобов (r = 0,40) и созревших семян с растения (r = 0,55), а также имеет отрицательную корреляцию с массой 1000 семян (r = –0,56). Масса созревших семян с растения с признаками «число узлов», «число узлов со зрелыми бобами» и «длина боба» имеет средний характер связи (r = 0,50, 0,64 и 0,42 соответственно), а также высокую связь с массой зрелых бобов с растения (r = 0,87).

Масса зрелых бобов с растения также имеет высокий уровень корреляции с числом узлов с созревшими бобами (r = 0,71). Очевидно, что число узлов высоко коррелирует с числом узлов обоих классов – с созревшими и невызревшими бобами (r = 0,90 и 0,71 соответственно). Также число узлов достоверно средне связано с числом ветвей (r = 0,54). В свою очередь, число ветвей также имеет среднюю характеристику связи с числом узлов со зрелыми и невызревшими бобами (r = 0,45 и 0,46 соответственно).

Окраска семян. Окраска семян у образцов коллекции ВИР не охватывает всю гамму, присущую семенам бобовых: от белой до черной. Отмечено четыре главных варианта окраски, в разной степени присущих образцам коллекции: серая, оттенки оливковой, светло- и темно-бежевая, коричневая разной степени интенсивности (рис. 2). Серо-оливковая и бежевая окраски характерны для большинства образцов.

Скороспелость. Эта характеристика образца сильно зависит от погодных условий. Универсальная привязка сроков созревания к определенной группе спелости крайне затруднена для разных географических локаций, к примеру для юга европейской части РФ и Индии. Известно, что в Индии скороспелые сорта созревают за 60–90 сут., позднеспелые имеют вегетационный период до 150 сут. (Pathak, 2015). В южной Италии самые скороспелые сорта созревали за 155–163 сут. (Gresta et al., 2018). В условиях РФ такой период вегетации невозможен. Поэтому о скороспелости образцов коллекции гуара ВИР, оцениваемых на территории РФ, мы судим косвенно по двум характеристикам:

1. Вызреваемость. Отношение числа узлов с созревшими бобами к общему числу узлов – косвенный, но важный показатель длительности вегетационного периода образцов. Чем выше этот показатель, тем скороспелее генотип. В нашем эксперименте он варьировал от 25,7 до 95,5% при среднем по выборке 60,3%. К сожалению, дескриптора для описания и ранжирования признаков гуара нет. Алгоритм оценки степени вызреваемости мы нашли в методических указаниях для арахиса (Vakhrusheva, 1995). Интересно, что в них этот признак позиционируется под рубрикой «Группа скороспелости (по % вызревающих бобов)». Если исходить из ранжирования генофонда арахиса на основе значений этого показателя, к скороспелым относятся генотипы с процентом вызревших бобов выше 69. В нашем опыте количество таких образцов в изученной выборке составило 37,5%. По среднему значению обсуждаемого нами показателя (60,3%) можно с большой степенью уверенности судить еще об одной важной характеристике изученных образцов – о реализации их потенциальной семенной продуктивности. В нашей выборке она реализовалась более чем наполовину.

Таким образом, критерий «вызреваемость» вполне можно использовать в качестве показателя скороспелости образцов, вегетационный период у которых продолжительнее, чем период вегетации в РФ.

2. Фотопериодическая чувствительность. Гуар – растение короткого дня. В работе С. Б. Архимандритовой (Тепляковой) с соавторами (Teplyakova et al., 2019) выявлен полиморфизм образцов коллекции ВИР по реакции на фотопериод и определены контрастные по этому признаку – рано и поздно цветущие генотипы. Здесь мы предлагаем алгоритм приведения полученных в нем результатов к принятому в ВИР определению коэффициента фотопериодической чувствительности $К_{фпч}$ (Koshkin, 2012), который, как сказано выше, невозможно оценить традиционным методом на фотопериодической площадке в г. Пушкине.

За короткий день приняли продолжительность фотопериода Кубанской ОС (в среднем за период изучения 15,4 ч), где образцы выращивали в поле, а за длинный – продолжительность светового дня в г. Пушкине – 18,2–18,9 ч, где те же генотипы выращивали в теплице при естественном освещении. Вычисленный $К_{фпч}$ в изученной выборке варьировал от 0,72 до 3,94. В международных классификаторах разных культур реакция на длину дня (диапазон изменчивости $К_{фпч}$) ранжируется на 3 (низкая, средняя, высокая) или на 5 классов (добавлены значения «очень низкая» и «очень высокая»). В соответствии со второй градацией мы отнесли генотипы гуара, имеющие $К_{фпч}$ менее 1,4 и 1,9, к очень низко- и низкофоточувствительным соответственно, что свидетельствует о возможности их вызревания в сравнительно высоких широтах и позволяет считать их скороспелыми. Общее количество таких генотипов составило 38,4% от исследуемой выборки.

Таким образом, по показателю вызреваемости к скороспелым генотипам относится 37,5% выборки и по фоточувствительности, изученной на другой выборке из коллекции, – 38,4%. Показатели имеют очень близкие значения. Поэтому мы считаем возможным и объективным суждение о скороспелости образцов по этим двум критериям.

Считаем уместным добавить комментарий о реакции растений южного происхождения на фотопериод высоких широт. Известно, что она срабатывает в сочетании с другими факторами окружающей среды, наиболее распространенный из которых – температура воздуха, что определяет ее как фототермальную реакцию (Vishnyakova et al., 2014; Novikova et al., 2022). Анализ температурных режимов периода перехода рано зацветающих генотипов гуара к цветению в двух разных по длине дня гео-

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между количественными признаками образцов гуара на поливе (Волгоградская опытная станция ВИР, 2024 г.)
Table 2. Correlation coefficients for quantitative traits of guar accessions under irrigation at the Volgograd Experiment Station of VIR, 2024

Признаки	Высота растения	Число ветвей	Число узлов	Число бобов в узле	Число узлов с созревшими бобами	Число узлов с незрелыми бобами	Масса зрелых бобов с растения	Длина боба	Число семян в бобе	Масса созревших семян с растения	Масса 1000 семян
Высота растения		0,11	0,09	0,03	–0,03	0,25	0,24	0,20	0,38*	0,36	–0,07
Число ветвей	0,11		0,54*	–0,23	0,45*	0,46*	–0,02	–0,32	–0,13	0,07	0,19
Число узлов	0,09	0,54*		–0,18	0,90*	0,71*	0,56*	–0,18	0,04	0,50*	–0,18
Число бобов в узле	0,03	–0,23	–0,18		–0,14	–0,16	0,20	0,11	0,10	0,16	0,06
Число узлов с созревшими бобами	–0,03	0,45*	0,90*	–0,14		0,34	0,71*	–0,04	0,13	0,64*	–0,18
Число узлов с невызревшими бобами	0,25	0,46*	0,71*	–0,16	0,34		0,05	–0,33	–0,11	0,05	–0,11
Масса зрелых бобов с растения	0,24	–0,02	0,56*	0,20	0,71*	0,05		0,36	0,40*	0,87*	–0,29
Длина боба	0,20	–0,32	–0,18	0,11	–0,04	–0,33	0,36		0,71*	0,42*	–0,30
Число семян в бобе	0,38*	–0,13	0,04	0,10	0,13	–0,11	0,40*	0,71*		0,55*	–0,56*
Масса созревших семян с растения	0,36	0,07	0,50*	0,16	0,64*	0,05	0,87*	0,42*	0,55*		–0,25
Масса 1000 семян	-0,07	0,19	–0,18	0,06	–0,18	–0,11	–0,29	–0,30	–0,56*	–0,25	

Примечание: * – выделены достоверные коэффициенты корреляции с уровнем значимости $p < 0,05$

Note: * – statistically significant correlation coefficients with a significance level of $p < 0.05$

Рис. 2. Окраска семян у образцов гуара коллекции ВИР
Fig. 2. Seed coloration in guar accessions from the VIR collection

графических точках изучения показал их сопоставимость, поэтому мы сочли корректным определение $К_{фпч}$ предлагаемым способом. Выявлена генотипическая изменчивость этого показателя и дифференциация изученных образцов на низко- и высокочувствительные к фотопериоду. Первые зацветают, развиваются и созревают значительно раньше (Teplyakova et al., 2019) и потому отнесены нами в категорию скороспелых. Метод определения $К_{фпч}$ одновременно в разных географических точках с контрастным фотопериодом кажется нам приемлемым для культур с требованиями к теплообеспечению выше, чем в условиях фотопериодической площадки ВИР в г. Пушкине, если другие, в частности температурные, параметры среды в этих местах сопоставимы.

Как сказано выше, дескриптор (классификатор) гуара пока не создан. Полагаем, что полученные в нашем исследовании данные могут быть положены в основу ранжирования значений признаков для условий РФ, что оптимизирует создание признаковых коллекций и структуризацию коллекционного материала.

Необходимо отметить, что в коллекции гуара ВИР и в изученной выборке преобладают местные индийские сорта, что можно принимать как своего рода гарантию значительного генетического разнообразия и возможности поиска оригинальных геномных вариантов. Это вытекает, во-первых, из известного правила «бутылочного горла» на этапе «доместикация – селекция» – потери части генетического разнообразия при создании сортов научной селекции (Tanksley, 1997). А во-вторых, показано, что в зародышевой плазме индийского гуара более высокий уровень генетического разнообразия, по сравнению с генофондом гуара США и Пакистана, поскольку индийский генофонд состоит из многих предковых групп (Malani, 2024).

Интересно, что результаты полевого изучения гуара в Индии (Pathak, 2015; Balakumbahan et al., 2020), США (Garcia et al., 2023), Италии (Gresta et al., 2018) зачастую сравнимы с полученными нами данными по ряду параметров структуры семенной продуктивности. При этом Волгоградская область, где получена большая часть наших данных по оценке коллекции в открытом грунте, – самая северная точка выращивания и изучения гуара в мире.

Наличие созданных отечественных сортов гуара – скороспелых и сравнительно продуктивных – свидетельство того, что у культуры есть перспективы производства в РФ, а коллекция ВИР содержит еще достаточно большое неиспользованное разнообразие, оцененное и ранжированное по целому ряду селекционно значимых признаков, которое послужит исходным материалом для адресной селекции культуры. Дальнейшее развитие исследований не только пополнит знания о характеристиках генофонда, но и позволит понять механизмы адаптивности и их генетические основы.

Заключение

Проанализирована изменчивость 13 селекционно значимых признаков у образцов коллекции гуара при выращивании на Волгоградской ОС ВИР. Приведены границы изменчивости изученных признаков, их средние значения по выборке и коэффициенты варьирования. По этим показателям можно судить о селекционном потенциале образцов коллекции ВИР для использования в региональной селекции в качестве исходного материала. Предложен модифицированный способ для определения реакции образцов гуара на фотопериод и их ранжирования в соответствии с коэффициентом фотопериодической чувствительности для косвенного определения скороспелости генотипов.

References / Литература

Balakumbahan R., Prabukumar G., Sivakumar V. Evaluation of cluster bean (*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub) genotypes for fruit and gum yield. *European Journal of Agriculture and Food Sciences.* 2020;2(5):1-4. DOI: 10.24018/ejfood.2020.2.5.ID

Bulyntsev S.V., Valyannikova T.I., Silaeva O.I., Kopot E.I., Pimonov K. Guar: a new legume crop for Russia. In: *Innovations in Crop Cultivation Technologies: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Persianovka: Don State Agrarian University; 2017. p.167-172. [in Russian] (Булынцев С.В., Вальянникова Т.И., Силаева О.И., Копоть Е.И., Пимонов К.И. Гуар – новая бобовая культура для России. В кн.: *Инновации*

в технологиях возделывания сельскохозяйственных культур: материалы Всероссийской научно-практической конференции. Персиановка: Донской ГАУ; 2017. С.167-172).

Dzyubenko E.A. Intraspecies polymorphizm of guar (*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.). *Vavilovia*. 2021;4(3):16-39. [in Russian] (Дзюбенко Е.А. Внутривидовой полиморфизм гуара (*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.). *Vavilovia*. 2021;4(3):16-39). DOI: 10.30901/2658-3860-2021-3-16-39

Garcia A., Grover K., VanLeeuwen D., Stringam B., Schutte B. Growth and performance of guar (*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.) genotypes under various irrigation regimes with and without biogenic silica amendment in arid Southwest US. *Plants (Basel).* 2023;12(13):2486. DOI: 10.3390/plants12132486

Gresta F., Avola G., Cannavò G., Santonoceto C. Morphological, biological, productive and qualitative characterization of 68 guar (*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.) genotypes. *Industrial Crops and Products.* 2018;114:98-107. DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.01.070

Koshkin V.A. Methodical approaches of diagnosis of photoperiodical sensitivity and earliness of plants. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2012;170:118-129. [in Russian] (Кошкин В.А. Методические подходы в диагностике фотопериодической чувствительности и скороспелости растений. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции.* 2012;170:118-129).

Kruchina-Bogdanov I.V., Miroshnichenko E.V., Shaukharov R.A., Kantemirova E.N., Golovina M.A., Abdullaev K.M. et al. Impact of growing conditions on the gum properties of different genotypes of guar (*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.). *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2019;23(7):941-948. DOI: 10.18699/VJ19.570

Kuravadi N., Verma S., Pareek S., Gahlot P., Kumari S., Tanwar U. et al. Guar: an industrial crop from marginal farms In: G.S. Bhullar, N.K. Bhullar (eds). *Agricultural Sustainability: Progress and Prospects in Crop Research*. Amsterdam: Elsevier; 2013. p.47-60. DOI: 10.1016/B978-0-12-404560-6.00003-4

Lebed D.V., Kostenkova E.V., Voloshin M.I. Agronomic rationale for the placement of *Cyamopsis tetragonoloba* (L.) in the south of the European part of Russia. *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*. 2017;1(9):53-64. [in Russian] (Лебедь Д.В., Костенкова Е.В., Волошин М.И. Агрономическое обоснование размещения посевов *Cyamopsis tetragonoloba* (L.) на юге европейской части России. *Таврический вестник аграрной науки*. 2017;1(9):53-64).

Malani S., Ravelombola W., Manley A., Pham H. Genetic diversity and population structure analysis in guar. *Plants.* 2024;13(22):3183 DOI: 10.3390/plants13223183

MMR. Guar gum market: global industry analysis and forecast (2025–2032): [website]. Available from: https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-guar-gum-market/17787 [accessed Apr. 27, 2025].

Novikova L., Seferova I., Matvienko I., Shchedrina Z., Vishniyakova M. Photoperiod and temperature sensitivity in early soybean accessions from the VIR collection in Leningrad Province of the Russian Federation. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 2022;46(6):947-954. DOI: 10.55730/1300-011X.3055

Pathak R. Clusterbean: physiology, genetics and cultivation. Singapore: Springer; 2015. DOI: 10.1007/978-981-287-907-3

Radchenko E.E., Sokolova D.V. Resistance of guar *Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub. to harmful organisms (review). *Agricultural Biology.* 2018;53(5):897-906. DOI: 10.15389/agrobiology.2018.5.897eng

Sindhuja S., Malik D.P., Kundu S., Kundu K.K. Trends and economic dynamics of guar in India. *Economic Affairs*. 2022;67(5):769-785. DOI: 10.46852/0424-2513.5.2022.11

State Register of Varieties and Hybrids of Agricultural Plants Admitted for Usage: [website]. [in Russian] (Государственный реестр сортов и гибридов сельскохозяйственных растений, допущенных к использованию: [сайт]). URL: https://gossortrf.ru/registry/gosudarstvennyy-reestr-selektsionnykh-dostizheniy-dopushchennykh-k-ispolzovaniyu-tom-1-sorta-rasteni [дата обращения: 18.06.2025].

Tanksley S.D., McCouch S.R. Seed banks and molecular maps: unlocking genetic potential from the wild. *Science.* 1997;277(5329):1063-1066 DOI: 10.1126/science.277.5329.1063

Teplyakova S.B., Volkov V.A., Dzyubenko E.A., Potokina E.K. Variability of the photoperiod response in guar (*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.) genotypes of different geographic origin. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2019;23(6):100-107. DOI: 10.18699/VJ19.547

Thombare N., Jha U., Mishra S., Siddiqui M.Z. Guar gum as a promising starting material for diverse applications: a review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2016;88:361-372. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2016.04.001

Vakhrusheva T.E. Evaluation of the peanut collection (*Arachis hipogaea* L.). Guidelines (Izucheniye kollektsii arakhisa (*Arachis hipogaea* L.). Metodicheskiye ukazaniya). St. Petersburg: VIR; 1995. [in Russian] (Вахрушева Т.Е. Изучение коллекции арахиса (*Arachis hipogaea* L.). Методические указания. Санкт-Петербург: ВИР; 1995).

Vishnyakova M.A., Dzyubenko E.A., Kocherina N.V., Agakhanov M.M., Shaukharov R.A. Phenotyping of guar accessions from the VIR collection under irrigation and artificial drought conditions in Volgograd Province. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(1):93-105. [in Russian] (Вишнякова М.А., Дзюбенко Е.А., Кочерина Н.В., Агаханов М.М., Шаухаров Р.А. Фенотипирование образцов гуара из коллекции ВИР в условиях полива и искусственной засухи в Волгоградской области. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(1):93-105). DOI: 10.30901/2227-8834-2025-1-93-105

Vishnyakova M.A., Koshkin V.A., Egorova G.P., Novikova L.Yu., Matvienko I.I. The photoperiod and temperature sensitivity of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in the North-West of Russia. *Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences.* 2014;(5):123-132. [in Russian] (Вишнякова М.А., Кошкин В.А., Егорова Г.П., Новикова Л.Ю., Матвиенко И.И. Фотопериодическая и температурная чувствительность фасоли (*Phaseolus vulgaris* L.) в условиях Северо-Запада РФ. *Труды Карельского научного центра Российской академии наук*. 2014;(5):123-132).

Vishniyakova M.A., Seferova I.V., Buravtseva T.V., Burlyaeva M.O., Semenova E.V., Filipenko G.I., Aleksandrova T.G., Egorova G.P., Yankov I.I., Bulyntsev S.V., Gerasimova T.V., Drugova E.V. VIR global collection of grain legume crop genetic resources: replenishment, conservation and studying. Guidelines. St. Petersburg: VIR; 2018. [in Russian] (Вишнякова М.А., Сеферова И.В., Буравцева Т.В., Бурляева М.О., Семенова Е.В., Филипенко Г.И., Александрова Т.Г., Егорова Г.П., Яньков И.И., Булынцев С.В., Герасимова Т.В., Другова Е.В. Коллекция мировых генетических ресурсов зерновых бобовых ВИР: пополнение, сохранение и изучение. Мето-

дические указания. Санкт-Петербург: ВИР; 2018). DOI: 10.30901/978-5-905954-79-5

Voloshin M.I., Bespalov E.A. Optimization of plant density of *Cyamopsis tetragonoloba* L. on the leached chernozems of western Ciscaucasia. *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*. 2019;2(18):15-22. [in Russian] (Волошин М.И., Беспалов Е.А. Оптимизация густоты стояния посевов гуара (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) на выщелоченном черноземе западного Предкавказья. *Таврический вестник аграрной науки*. 2019;2(18):15-22). DOI: 10.33952/2542-0720-2019-2-18-15-22

Whistler R.L. Guar – a new industrial crop. *Chemistry and Industry*. 1948;62:60-61.

Whistler R.L., Hymowitz T. Guar: agronomy, production, industrial use, and nutrition. West Lafayette, IN: Purdue University Press; 1979.

Информация об авторах

Маргарита Афанасьевна Вишнякова, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растении имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, m.vishnyakova.vir@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-2808-7745

Рамазан Абатович Шаухаров, специалист, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Волгоградская опытная станция – филиал ВИР, 404160 Россия, Волгоградская область, Среднеахтубинский район, Краснослободск, квартал Опытная станция ВИР, 30, romanshauharov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9794-104X

Наталья Викторовна Кочерина, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растении имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, alle007@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8791-1899

Серафима Борисовна Архимандритова, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растении имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, serafima.teplyakova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5624-4245

Елена Александровна Дзюбенко, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, elena.dzyubenko@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4576-1527

Information about the authors

Margarita A. Vishnyakova, Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, m.vishnyakova.vir@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-2808-7745

Ramazan A. Shaukharov, Specialist, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Volgograd Experiment Station – branch of VIR, 30 VIR Exp. Station Block, Krasnoslobodsk 404160, Russia, romanshauharov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9794-104X

Natalia V. Kocherina, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, alle007@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8791-1899

Serafima B. Arkhimandritova, Associate Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, serafima.teplyakova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5624-4245

Elena A. Dzyubenko, Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, elena.dzyubenko@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4576-1527

Вклад авторов: Вишнякова М. А. – концепция; анализ данных; написание. Шаухаров Р. А. – фенотипирование. Кочерина Н. В. – статистическая обработка и интерпретация данных. Архимандритова С. Б. – сбор и анализ данных по фотопериоду. Дзюбенко Е. А. – иллюстрации, редактирование

Contribution of the authors: Vishnyakova M. A. – conceptualization; data analysis; writing. Shaukharov R. A. – phenotyping. Kocherina N. V. – statistics and data interpretation. Arkhimandritova S. B. – photoperiod data collection and analysis. Dzyubenko E. A. – illustrations and editing.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 01.08.2025; одобрена после рецензирования 22.08.2025; принята к публикации 04.09.2025.
The article was submitted on 01.08.2025; approved after reviewing on 22.08.2025; accepted for publication on 04.09.2025.

КОЛЛЕКЦИИ МИРОВЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СЕЛЕКЦИИ

Научная статья
УДК 635.24
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-173-186

CC BY

Биологически активные вещества в клубнях образцов топинамбура (*Helianthus tuberosus* L.) из коллекции ВИР

Н. В. Лебедева[1], А. В. Любченко[2], А. Е. Соловьева[1], И. В. Варганова[1], Е. В. Рогозина[1]

[1] *Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия*

[2] *Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Майкопская опытная станция – филиал ВИР, Майкопский район, Россия*

Автор, ответственный за переписку: Алла Евгеньевна Соловьева, a.solovyeva@vir.nw.ru

Актуальность. Разнообразие природно-климатических условий Северного Кавказа обуславливает важность изучения сортовых реакций топинамбура на возделывание в определенных эколого-географических зонах. Оценка образцов коллекции топинамбура ВИР, сохраняемой в регионе, актуальна для выяснения изменчивости культуры по продуктивности и биохимическому составу клубней и при выборе сорта, перспективного для выращивания. Цель исследования: изучить биохимический состав клубней топинамбура, поддерживаемых в полевом генбанке на Майкопской опытной станции – филиале ВИР (Республика Адыгея).
Материалы и методы. Материалом исследования послужили 19 образцов топинамбура из коллекции Майкопской опытной станции. Топинамбур выращивали как однолетнюю культуру – клубни перезимовывали в поле, а весной высаживались на новый участок. Анализ продуктивности проведен для образцов урожая 2021, 2022 г. Анализ биохимического состава клубней проведен для образцов урожая 2021–2023 гг. в отделе биохимии и молекулярной биологии ВИР с использованием стандартных методов.
Результаты. Высокая продуктивность клубней топинамбура в течение двух лет отмечена у образца ‘Сахалинский Красный’ (2,2 кг/раст.). Выявлены образцы с высоким содержанием биологически активных веществ: инулина – ‘Австралийский’ (14,10 ± 1,41%), ‘Лола’ (13,73 ± 1,28%), ‘Topianka’ (13,43 ± 2,06%), ‘Waldspiendel’ (13,32 ± 1,60%), ‘Зори Кавказа’ (13,22 ± 0,93%); сухих веществ – ‘Тамбовский Красный’ (27,66 ± 0,60%); суммы сахаров – ‘Лола’ (19,02 ± 3,48%); белка – ‘Австралийский’ (3,65 ± 0,67%). Сорт ‘Находка’ сохраняет высокий потенциал продуктивности (2,68 кг/раст.) при благоприятных условиях периода вегетации.
Заключение. В коллекции ВИР выделены образцы с высокой и стабильной продуктивностью клубней, ценным биохимическим составом (высокое содержание инулина, аскорбиновой кислоты), высоким содержанием питательных веществ (белка).

Ключевые слова: инулин, сахара, аскорбиновая кислота, антоцианы, общая кислотность, сухое вещество, белок, биохимический анализ, продуктивность, клубни

Благодарности: исследование выполнено в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР) «Совершенствование подходов и методов *ex situ* сохранения идентифицированного генофонда клубнеплодных культур (картофель, топинамбур) и их диких родичей, разработка технологий их эффективного использования в селекции» (FGEM-2025-0005). Авторы благодарят бывшего сотрудника Майкопской опытной станции – филиала ВИР Н. М. Пасько, внесшего огромный вклад в формирование и пополнение коллекции топинамбура.
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Лебедева Н.В., Любченко А.В., Соловьева А.Е., Варганова И.В., Рогозина Е.В. Биологически активные вещества в клубнях топинамбура (*Helianthus tuberosus* L.) коллекции ВИР. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(3):173-186. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-173-186

© Лебедева Н.В., Любченко А.В., Соловьева А.Е., Варганова И.В., Рогозина Е.В., 2025

COLLECTIONS OF THE WORLD'S CROP GENETIC RESOURCES FOR THE DEVELOPMENT OF PRIORITY PLANT BREEDING TRENDS

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-173-186

Bioactive compounds in Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) tubers from the VIR collection

Natalia V. Lebedeva[1], Alexandr V. Lyubchenko[2], Alla E. Solovyeva[1], Irina V. Varganova[1], Elena V. Rogozina[1]

[1] *N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia*

[2] *N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Maikop Experiment Station – branch of VIR, Maikop District, Russia*

Corresponding author: Alla E. Solovyeva, a.solovyeva@vir.nw.ru

Background. Diverse nature and climate conditions in the North Caucasus invoke the importance of studying cultivar-specific responses of Jerusalem artichoke to cultivation in certain ecogeographic areas. Evaluation of Jerusalem artichoke accessions preserved at VIR is relevant for disclosing the crop's variability in productivity and biochemical composition of its tubers and choosing cultivars promising for cultivation. The objective was to examine the biochemical composition of Jerusalem artichoke tubers maintained in the field gene bank at Maikop Experiment Station of VIR (Adygea, Russia).
Materials and methods. Nineteen Jerusalem artichoke accessions from Maikop Experiment Station served as the material for the study. They were grown as an annual crop: the tubers overwintered in the field, and were transplanted to new plots in the following spring. Tuber productivity was assessed in the plants harvested in 2021 and 2022. Biochemical composition was analyzed in the reproductions of the 2021–2023 harvests at the Biochemistry and Molecular Biology Department of VIR using conventional techniques.
Results. High productivity over two years was recorded for 'Sakhalinskiy Krasny' (2.2 kg/plant). Accessions with high content of bioactive compounds were identified: for inulin, 'Australian' (14.10 ± 1.41%), 'Lola' (13.73 ± 1.28%), 'Topianka' (13.43 ± 2.06%), 'Waldspiendel' (13.32 ± 1.60%) and 'Zori Kavkaza' (13.22 ± 0.93 %); for dry matter, 'Tambovskiy Krasny' (27.66 ± 0.60%); for total sugars, 'Lola' (19.02 ± 3.48%); for protein, 'Avstraliyskiy' (3.65 ± 0.67%). Cv. 'Nakhodka' maintained its potential for high productivity (2.68 kg/plant) under favorable growing season conditions.
Conclusion. Screening of VIR's Jerusalem artichoke collection resulted in identifying accessions with high and stable tuber productivity, valuable biochemical composition, and high content of bioactive compounds (inulin, and ascorbic acid) and nutrients (protein).

Keywords: inulin, sugars, ascorbic acid, anthocyanins, total acidity, dry matter, protein, biochemical analysis, productivity, tubers

Acknowledgements: the study was conducted within the framework of the state task assigned to the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), No. FGEM-2025-0005 "Improving approaches and methods for *ex situ* conservation of the identified genetic diversity of tuber crops (potato, and Jerusalem artichoke) and their wild relatives, and developing technologies for their effective use in breeding".
The authors express their deep gratitude to N. M. Pasko, the late staff member of Maikop Experiment Station of VIR, who made a huge contribution to the formation and replenishment of the Jerusalem artichoke collection.
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Lebedeva N.V., Lyubchenko A.V., Solovyeva A.E., Varganova I.V., Rogozina E.V. Bioactive compounds in Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) tubers from the VIR collection. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(3):173-186. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-173-186

Введение

Топинамбур, или подсолнечник клубненосный (*Helianthus tuberosus* L.), – многолетнее травянистое клубненосное растение сем. Asteraceae Dumort. родом из Северной Америки. Это одна из универсальных сельскохозяйственных культур, пригодная для использования на пищевые, кормовые, биоресурсные, медицинские, декоративные и технические цели. Богатый биохимический состав всех частей растения (клубней, листьев и стеблей) установлен многими исследователями (Sawicka et al., 2020; Liava et al., 2021; Manokhina et al., 2022). Высокая урожайность и относительная нетребовательность к уходу, способность к ежегодному возобновлению и устойчивость к неблагоприятным факторам среды определяют преимущества топинамбура как источника сырья для создания высокоэффективных пищевых продуктов.

Культура топинамбура приобретает все большее значение на мировом рынке сельскохозяйственной продукции благодаря высокой продуктивности, питательной ценности и адаптивности к условиям выращивания (Hanci, 2023). Топинамбур возделывают в 25 странах на всех континентах (Liava et al., 2021). В России промышленным способом топинамбур выращивают на площади 3000 га (Manokhina et al., 2022). При возделывании топинамбура большое значение имеет правильный выбор сорта. Несмотря на высокую адаптивность культуры, для обеспечения максимальной фотосинтетической активности растений и получения хорошего урожая и высокого качества продукции необходимо учитывать биологические особенности сорта, географическое положение и климатические условия местности, состав и структуру почвы, агротехнику возделывания (Kosaric et al., 1984; Kiru, Nasenko, 2010; Liava et al., 2021; Manokhina et al., 2022). В Государственном реестре сортов и селекционных достижений РФ представлены пять сортов топинамбура: ‘Интерес’, ‘Омский Белый’, ‘Пасько’, ‘Скороспелка’ и ‘Солнечный’, допущенные к использованию во всех зонах возделывания культуры (https://reestr.gossortrf.ru). Ввиду чрезвычайного разнообразия природно-климатических условий на территории России изучение сортовых реакций топинамбура в определенных эколого-географических зонах, оценка продуктивности и биохимического состава клубней актуальны и позволяют выбрать сорт, наиболее перспективный для выращивания на пищевые цели в конкретном регионе.

Клубни и надземная масса топинамбура содержат большое количество пектина, пищевых волокон, белка, аминокислот, в том числе незаменимых, жизненно важных макро- и микроэлементов, а также органических и жирных кислот, обладающих сильным антиоксидантным действием. По содержанию магния, железа, кремния, цинка, а также витаминов B1, B2 и C топинамбур превосходит картофель, морковь, столовую свеклу (Khristich et al., 2015). Клубни топинамбура не содержат алкалоид солонин, образующийся на свету в сыром картофеле. Топинамбур обладает уникальной способностью накапливать высокое содержание инулина. Вместе с тем клубни и надземная масса топинамбура не накапливают тяжелые металлы (свинец, ртуть, мышьяк и др.) и радионуклиды (Lebedeva et al., 2019). Уникальный биохимический состав топинамбура позволил рекомендовать его в качестве сырья для создания и производства функциональных продуктов питания (Manokhina et al., 2022).

По данным ФАО, в 2009 г. 468 образцов *H. tuberosus* сохранялось в мировых генных банках; самые представительные коллекции (более чем 100 образцов) существовали в Канаде, Сербии, Германии, США, Франции и России (Diederichsen, 2010). В связи с трудностью поддержания полевой коллекции в генбанке США образцы топинамбура перевели в семенную коллекцию, несколько уменьшился состав коллекций Германии и Сербии, продолжают сохранять в виде клонов 180 образцов топинамбура во Франции (Terzić et al., 2020). На Майкопской опытной станции ВИР собрана и поддерживается в живом виде одна из наиболее представительных коллекций топинамбура в мире: она включает более 400 образцов, собранных в течение 80 лет (Lebedeva et al., 2019). Исследование образцов топинамбура из мировых коллекций проводится по разным направлениям. Проведено агробиологическое изучение по 23 дескрипторам коллекции топинамбура в Канаде (Diederichsen, 2010). Продуктивность, скороспелость и устойчивость к болезням изучены у образцов топинамбура в коллекции Франции (Serieys et al., 2010), продуктивность, морфологические признаки клубней и соцветий – у образцов топинамбура в коллекции ВИР (Kiru, Nasenko, 2010; Smekalova et al., 2019). Обширные выборки образцов топинамбура из разных коллекций охарактеризованы по продуктивности и содержанию инулина (Puttha et al., 2012), генетической структуре и генетическому родству (Wangsomnuk et al., 2011).

Разную продуктивность и биохимический состав клубней имеют сорта топинамбура в странах Европы (Rossini et al., 2019; Sawicka et al., 2021), образцы топинамбура, возделываемые в 24 провинциях Китая (Liu et al., 2011), сорта и образцы топинамбура в Беларуси, Центральном и Северо-Западном регионах России, в Западной Сибири (Kiru, Nasenko, 2010; Leontiev et al., 2014; Khristich et al., 2015; Manokhina et al., 2022). Отечественные и зарубежные сорта топинамбура, сохраняемые длительное время на Майкопской опытной станции ВИР (Майкопская ОС), представлены разнообразием сортотипов, классификация которых проведена Н. М. Пасько по ряду морфологических признаков (Lebedeva et al., 2019). Изучение биохимического состава клубней у образцов топинамбура, адаптированных к условиям Северо-Кавказского региона, представляет особый интерес и важно для более полной характеризации разнообразия культуры и отбора материала, ценного для селекции или непосредственного выращивания в производстве.

Цель данной работы – оценка по биохимическому составу клубней 19 образцов топинамбура в условиях Северо-Кавказского региона. Новизна исследования заключается в определении комплекса биохимических показателей клубней топинамбура: содержания сухого вещества, углеводов с учетом инулина, белка, органических кислот, аскорбиновой кислоты, антоцианов и оценке их изменчивости под влиянием климатических условий.

Материалы и методы

Изучены в течение 2021–2023 гг. 19 образцов топинамбура из коллекции ВИР, поддерживаемой на Майкопской ОС ВИР (регион – Северный Кавказ, Республика Адыгея, окрестности г. Майкоп).

Исследованы образцы топинамбура иностранной и российской селекции, разных групп спелости, адаптированные к условиям региона (табл. 1). Сорт ‘Омский Белый’, включенный в Госреестр сортов и селекционных достижений в 2014 г., использован в качестве стандарта.

Таблица 1. Изученные образцы топинамбура из коллекции Майкопской опытной станции ВИР
Table 1. The studied Jerusalem artichoke accessions from Maikop Experiment Station of VIR

№ по каталогу ВИР	Название	Происхождение	Интенсивность антоциановой окраски кожуры клубней*	Группа спелости
1	‘Běloslupké’	Чехословакия	отсутствует или очень слабая	позднеспелый
3	‘Киевский Белый’	Украина	отсутствует или очень слабая	позднеспелый
4	‘Сахалинский Красный’	Япония	сильная (отсутствует или очень слабая)	позднеспелый
6	‘Венгерский’	Венгрия	отсутствует или очень слабая	среднеспелый
10	‘Тамбовский Красный’	Россия	очень сильная (отсутствует или очень слабая)	среднеспелый
14	‘Горно-Алтайский’	Россия	очень сильная (отсутствует или очень слабая	раннеспелый
25	‘Белый Урожайный’	Россия	отсутствует или очень слабая	позднеспелый
26	‘Австралийский’	Австралия	отсутствует или очень слабая	среднеспелый
68	‘Waldspindel’	Германия	сильная (средняя)	среднеспелый
70	‘Topianka’	Германия	сильная (средняя)	среднеспелый
78	‘Толбухин’	Болгария	отсутствует или очень слабая	среднеспелый
84	‘Находка’	Россия	отсутствует или очень слабая	среднеспелый
85	‘Amerikan’	США	средняя (отсутствует или очень слабая)	позднеспелый
193	‘Violet de Rennes’	Франция	очень сильная (средняя)	позднеспелый
194	‘Progress’	Франция	отсутствует или очень слабая	среднеспелый
313	‘Зори Кавказа’	Россия	очень сильная	позднеспелый
314	‘Омский Белый’ (стандарт)	Россия	отсутствует или очень слабая	позднеспелый
326	‘Лола’	Россия	сильная (средняя)	позднеспелый
354	2051	США	очень сильная (сильная)	позднеспелый

Примечание: * – в скобках приведена интенсивность антоциановой окраски клубней топинамбура, изученных в 2021–2023 гг.
Note: * – parenthesized is the intensity of anthocyanin coloration in Jerusalem artichoke tubers studied in 2021–2023

Топинамбур выращивали как однолетнюю культуру: клубни перезимовывали в поле, а во второй декаде апреля образцы пересаживали на новый участок. Каждый образец в питомнике занимал однорядковую делянку площадью 3,92 м^2 с размещением на ней восьми гнезд по схеме 0,70 × 0,70 м. Растения высаживали в борозды, глубина посадки 8–10 см. После появления массовых всходов (не менее шести в делянке) междурядья на новом участке культивировались в одном направлении. В дальнейшем, после первой ручной прополки, проводилась подкормка аммиачной селитрой в количестве 250 кг/га с последующей культивацией. Дорожки между ярусами на участке периодически дисковались.

Учет агрометеоусловий (температура воздуха и количество осадков) выполнен на приборах метеопоста Майкопской ОС. Для более полной характеристики режима увлажнения определяли гидротермический коэффициент Г. Т. Селянинова (ГТК), выражающий отношение суммы осадков к сумме средних температур, уменьшенной в 10 раз.

Климат Республики Адыгеи сравнительно теплый, влажный. По многолетним данным метеопоста, в среднем зафиксированы малоснежные зимы, умеренно-холодные, мягкие, с частым чередованием морозных периодов и оттепелей, что может приводить к подмерзанию культуры топинамбура. В апреле вероятность засушливых условий достаточно высока. Осадки в летние месяцы выпадают крайне неравномерно и часто имеют кратковременный, ливневый характер. Во второй половине лета почти каждый год наблюдаются засушливые периоды. Запасы воды в почве нередко снижаются до недоступных уровней, образуя глубокие трещины. В отдельные дни июля и августа температура воздуха может достигать +45°С, а на поверхности

почвы – до +64°C. Суховеи отмечаются около 60 дней в году.

Продуктивность оценивали в 2022–2023 гг. ранней весной после стаивания снега. Для учета продуктивности клубней выбирали три растения (пробы) каждого образца. Выкапывали клубни ручным способом, в каждой пробе подсчитывали число образовавшихся клубней, затем взвешивали их на электронных весах и полученные данные записывали в таблицу. Все учеты проводили в полевых условиях.

Для биохимического анализа ежегодно проводили специальный отбор клубней (8–10 шт. с одного типичного растения) у образцов в поле в последней декаде октября.

Биохимическое исследование клубней топинамбура проводили ежегодно в 2021–2023 гг. Определяли содержание сухого вещества, углеводного комплекса (инулин, редуцирующие сахара, сахароза), белка, органических кислот, аскорбиновой кислоты (витамина С), пигментов (антоцианов). Анализы проведены в отделе биохимии и молекулярной биологии ВИР (Санкт-Петербург). Данные биохимического анализа представлены на сырое вещество по всем показателям, кроме содержания антоцианов, которые выражали на абсолютно сухое вещество. Определяли среднее значение показателя (x) и ошибку среднего значения (± Sx).

Образцы клубней промывали водопроводной водой, взвешивали и сушили на воздухе. Из отобранных для анализа клубней формировали объединенную пробу. Клубни промывали, просушивали и измельчали. Образцы были обработаны и проанализированы, как описано ранее, по методике А. И. Ермакова и соавторов (Ermakov et al., 1987).

Содержание сухого вещества определяли термогравиметрическим методом, путем высушивания образцов до постоянного веса при температуре 105°C (GOST 33977-2016…, 2019). Содержание сахара оценивали стандартным методом Бертрана, который основан на восстановительном действии сахара на щелочной раствор тартратного комплекса с ионом меди; образовавшуюся закись меди растворяли в теплом кислом растворе железистых квасцов. Трехвалентные квасцы восстанавливали до $FeSO_4$, который титровали по стандартизированному $KMnO_4$; Cu-эквивалент соотносили с таблицей для получения количества редуцирующего сахара (GOST 26176-2019…, 2020). Содержание инулина измеряли по разнице между общим количеством углеводов, найденных после горячей экстракции водой и 82-процентным этиловым спиртом (Ermakov et al., 1952). Содержание белка определяли по методу Кьельдаля: среднюю пробу высушенного (при 60°C) материала минерализировали при нагревании с концентрированной серной кислотой при 420°C в течение полутора часов. Определение азота проводили на автоматическом анализаторе Kjeltec 2200 (FOSS, Швеция) с последующим титрованием 0,1 н раствором серной кислоты. Общее содержание белка рассчитывали по азоту с коэффициентом 6,25 (GOST 13496.4-2019…, 2019). Общую (титруемую) кислотность определяли путем титрования экстракта 0,1 н щелочью в пересчете на яблочную кислоту; аскорбиновую кислоту определяли путем прямой экстракции из растений 1-процентной соляной кислотой с последующим титрованием 2,6-дихлориндофенолом (GOST 24556-89…, 1989). Антоцианы извлекали экстракцией раствором 1-процентной соляной кислоты, с последующим спектрофотометрированием при длине волны 510 нм, в пересчете на цианидин-3,5-дигликозид. Содержание общего количества антоцианов рассчитывали по формуле с использованием удельного показателя поглощения цианидин-3,5-дигликозид-хлорида в 1-процентном водном растворе соляной кислоты. Для внесения поправки на содержание зеленых пигментов одновременно определяли оптическую плотность полученных экстрактов при длине волны 657 нм (Chupakhina, Maslennikov, 2004).

Статистический анализ данных оценки сортов топинамбура по продуктивности и биохимическим показателям клубней выполнен в программе Statistica 13. Определяли среднее значение, ошибку, дисперсию, медиану и коэффициент вариации каждого показателя. Использованы методы параметрической и непараметрической статистики в зависимости от вида распределения показателей, различия статистически значимы при $p < 0,05$.

Результаты

Агрометеорологические условия

Агрометеорологические условия вегетационных сезонов 2021–2023 гг. были контрастными по обеспеченности теплом и влагой. Средняя месячная температура воздуха вегетационных периодов 2021, 2022 и 2023 г. составила 16,2°C, 15,3°C и 16,5°C соответственно, при норме 14,9°C (рис. 1). Среднее месячное количество осадков в 2021, 2022 и 2023 г. составило 84,3 мм, 68,1 мм и 83,6 мм соответственно, при норме в 75,6 мм (рис. 2).

В 2021 г., по сравнению со средними многолетними данными наблюдений, два первых весенних месяца отличались пониженной температурой; в дальнейшем, с мая по сентябрь, температура превышала средние многолетние значения (см. рис. 1). Обильные осадки стали причиной периода избыточного увлажнения весной и в начале лета, который сменился периодом дефицита влаги в летне-осенние месяцы (см. рис. 2; табл. 2). В 2022 г. отмечены повышенные температуры в апреле, июне, августе и сентябре, пониженные – в марте и мае. Осадков во все месяцы, кроме сентября, выпало меньше, чем средние многолетние значения, поэтому в летние месяцы отмечен дефицит влаги (см. табл. 2). В 2023 г. отмечены более теплые март и август, в остальные месяцы температура была близка к норме; избыточное количество осадков весной и в начале лета сменилось засухой в летне-осенние месяцы (см. рис. 2, табл. 2). В каждый год наблюдений отмечены засушливые условия в июле – августе (см. табл. 2).

Продуктивность

Образцы топинамбура различаются по продуктивности, показатели которой варьировали в годы исследования в зависимости от генотипа (особенностей сорта) и среды (условий периода вегетации) (рис. 3).

Различия по продуктивности (см. рис. 3) между сортами топинамбура в годы исследования достоверны: критерий Фишера $F = 4,94$ ($p < 0,001$). Влияние фактора «год» также значимо: критерий Фишера $F = 40,7$ ($p < 0,001$). В целом более высокая продуктивность исследованной выборки сортов топинамбура получена в 2022 г. (2,4 кг клубней на одно растение), чем в 2023 г. (1,4 кг/раст.), что, очевидно, связано с более благоприятным режимом влагообеспеченности (см. табл. 2). Высокая продуктивность (более 2 кг клубней на растении в среднем за два года) отмечена у среднеспелых сортов: ‘Тамбовский Красный’, ‘Австралийский’, ‘Толбухин’, ‘Находка’; позднеспелых сортов: ‘Bĕloslupké’, ‘Киевский Белый’, ‘Сахалин-

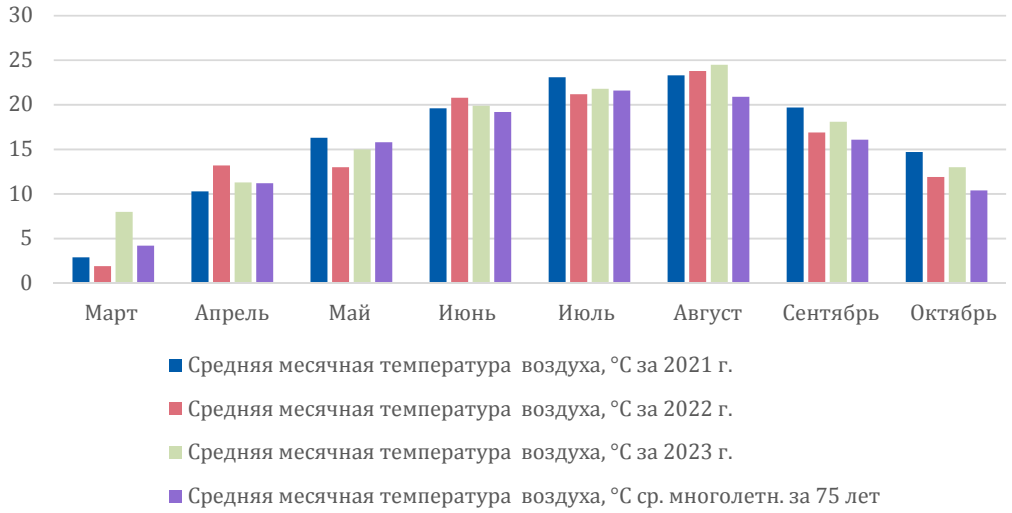


Рис. 1. Средняя месячная сумма температуры воздуха, °С (Майкопская опытная станция ВИР, 2021–2023 гг.)
Fig. 1. Mean monthly air temperatures, °C (Maikop Experiment Station of VIR, 2021–2023)

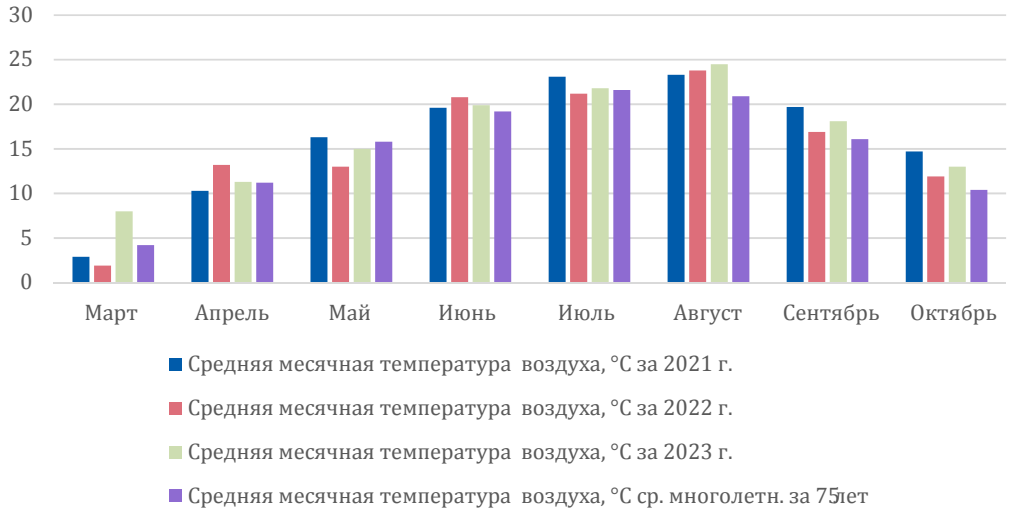


Рис. 2. Средняя месячная сумма осадков, мм (Майкопская опытная станция ВИР, 2021–2023 гг.)
Fig. 2. Mean monthly precipitation, mm (Maikop Experiment Station of VIR, 2021–2023)

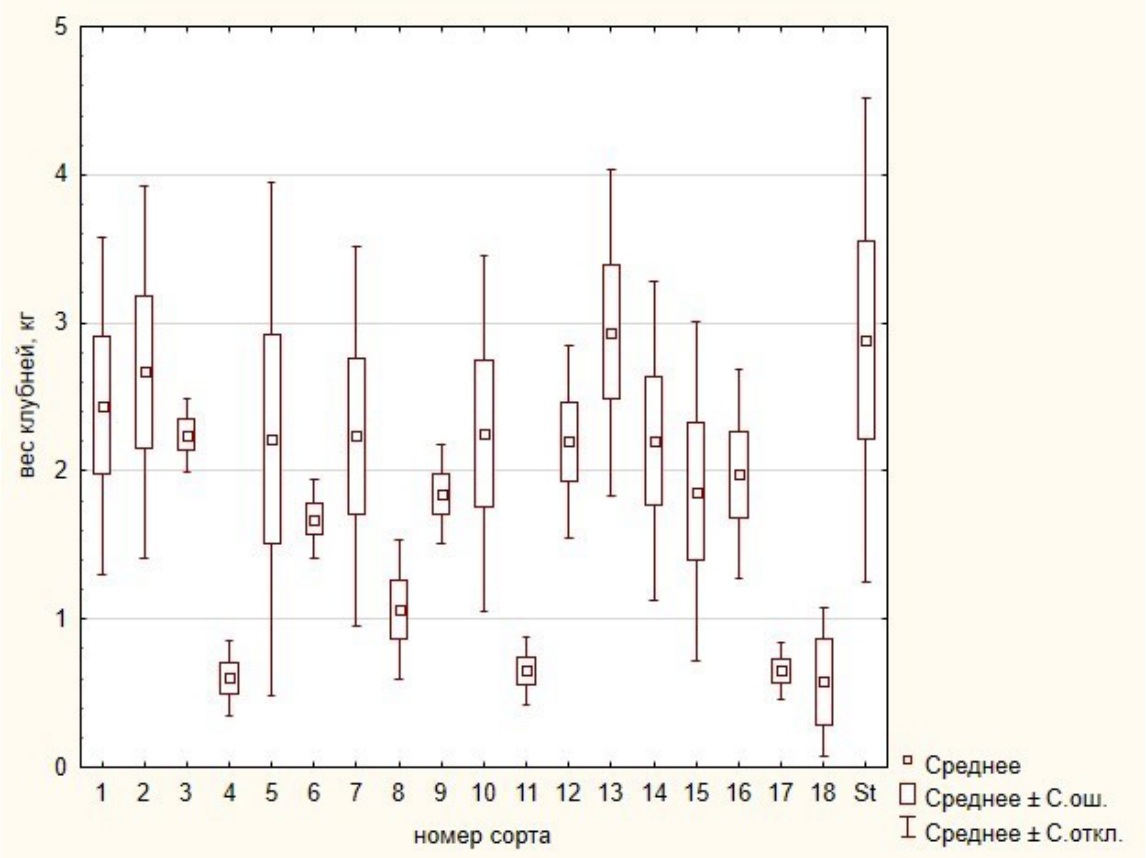
Таблица 2. Характеристика уровня влагообеспеченности территории Майкопской опытной станции ВИР (по коэффициенту Г. Т. Селянинова) в 2021–2023 гг.

Table 2. Moisture supply levels at Maikop Experiment Station of VIR (according to G. T. Selyaninov coefficient) in 2021–2023

Год	Месяц						
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
2021	3,4	2,3	2,9	0,5	1	0,9	1,2
2022	1,4	1,8	1	1	1	2,5	1,7
2023	4,3	2,4	2,1	0,7	0,3	0,2	1,7
Среднее многолетнее	2	2,0	1,8	1,2	1,2	1,4	2,6

Примечание: градация ГТК: до 0,5 – засуха; 0,6–1,0 – засушливо; 1,1–1,4 – умеренное увлажнение; 1,5–2,0 – хорошее увлажнение; выше 2,0 – избыточное увлажнение

Note: HTC gradation: up to 0.5 = drought; 0.6–1.0 = arid; 1.1–1.4 = moderate moisture; 1.5–2.0 = good moisture; above 2.0 = excessive moisture



Среднее – среднее значение показателя продуктивность / mean value of productivity;
Ст. ош. – ошибка среднего значения / error of the mean;
Ст. откл. – стандартное отклонение / standard deviation

Рис. 3. Продуктивность (масса клубней с одного растения) образцов топинамбура на Майкопской опытной станции ВИР в 2022–2023 гг.:
1 – 'Běloslupké', **2** – 'Киевский Белый', **3** – 'Сахалинский Красный', **4** – 'Венгерский', **5** – 'Тамбовский Красный', **6** – 'Горно-Алтайский', **7** – 'Австралийский', **8** – 'Waldspindel', **9** – 'Topianka', **10** – 'Толбухин', **11** – 'Белый Урожайный', **12** – 'Находка', **13** – 'Amerikan', **14** – 'Violet de Rennes', **15** – 'Progress', **16** – 'Зори Кавказа', **17** – 'Лола', **18** – 2051, **St** – 'Омский Белый' (стандарт)

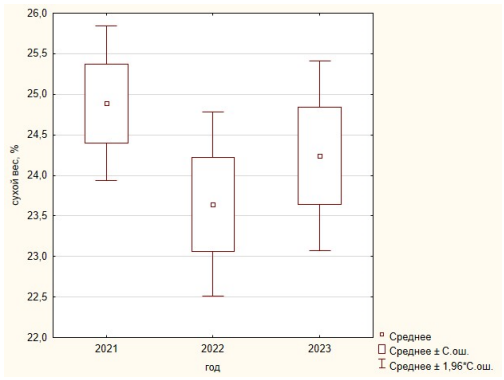
Fig. 3. Productivity (yield of tubers per plant) of Jerusalem artichoke accessions at Maikop Experiment Station of VIR in 2022–2023:
1 – 'Běloslupké', **2** – 'Kievskiy Bely', **3** – 'Sakhalinskiy Krasny', **4** – 'Vengersky', **5** – 'Tambovskiy Krasny', **6** – 'Gorno-Altayskiy', **7** – 'Avstraliyskiy', **8** – 'Waldspindel', **9** – 'Topianka', **10** – 'Tolbukhin', **11** – 'Bely Urozhayny', **12** – 'Nakhodka', **13** – 'Amerikan', **14** – 'Violet de Rennes', **15** – 'Progress', **16** – 'Zori Kavkaza', **17** – 'Lola', **18** – 2051, **St** – 'Omsky Bely' (reference)

ский Красный', 'Amerikan', 'Violet de Rennes' и стандарта 'Омский Белый'. Однако метеоусловия в значительной степени влияли на продуктивность клубней у большинства образцов. Коэффициент вариации по этому показателю у исследованной выборки сортов топинамбура составил 60%. Среди высокопродуктивных сортов только у сорта 'Сахалинский Красный' продуктивность (2,2 кг/раст.) была стабильна в течение двух лет, у остальных сортов этот показатель варьировал в значительной степени (см. рис. 3). Не выявлено связи между продуктивностью и группой спелости сортов топинамбура. Реакция на погодные условия более выражена у сортов с высокой продуктивностью, независимо от группы спелости, нежели чем реакция сортов с низкой продуктивностью. Единственный раннеспелый сорт 'Горно-Алтайский' оказался малочувствительным к нестабильности режимов тепла и влаги: его продуктивность снизилась незначительно, с 1,8 кг/раст. в 2022 г. до 1,5 кг/раст. в 2023 г. (см. рис. 3).

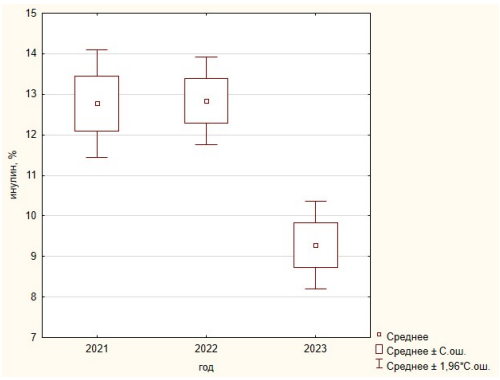
Биохимический состав клубней топинамбура

Характеристики биохимического состава клубней топинамбура в значительной степени зависели от условий периода вегетации (рис. 4). Различия по содержанию инулина, аскорбиновой кислоты, антоцианов, суммы сахаров, общей кислотности и содержанию белка в исследованной выборке сортов в зависимости от года исследования достоверны: критерий Фишера $F = 11,7$, $F = 33,1$, $F = 27,3$, $F = 6,6$, $F = 28,3$, $F = 13,4$ соответственно ($p < 0,01$). Не выявлена существенность различий по показателю «содержание сухого вещества» (см. рис. 4, а).

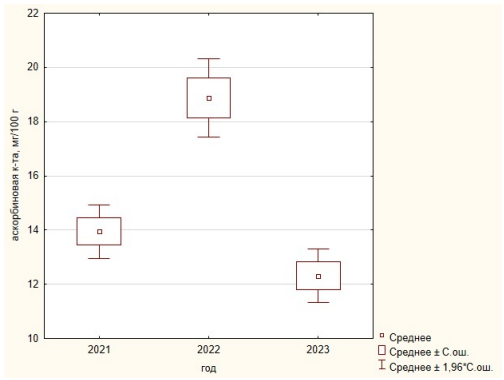
В 2023 г. по сравнению с 2021 г. содержание инулина в клубнях растений топинамбура уменьшилось почти на 30%, сахаров – почти на 20% (см. рис. 4, б, г). Содержание антоцианов, напротив, было наибольшим в урожае клубней 2023 г., увеличившись в пять раз по сравнению с показателями 2021 г. (см. рис. 4, д). Общая кислотность в 2023 г. по сравнению с 2021 и 2022 г. увеличилась на



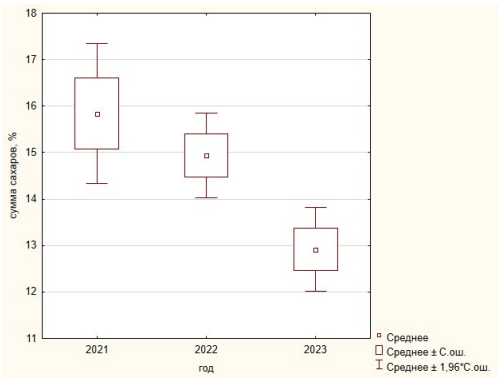
а



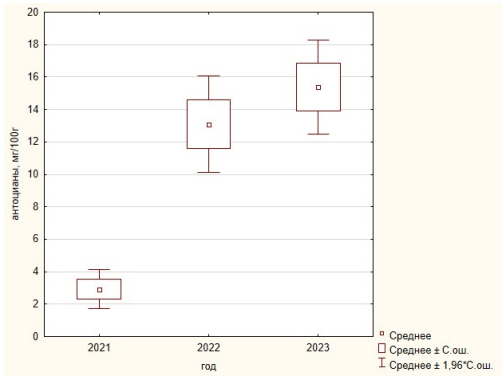
б



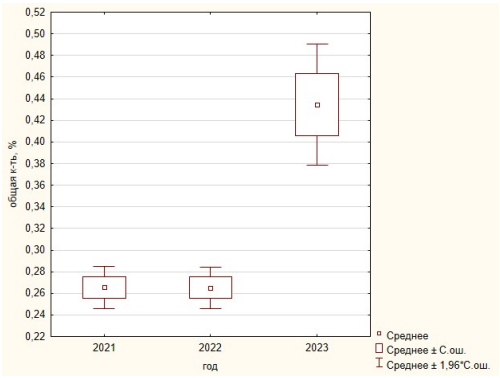
в



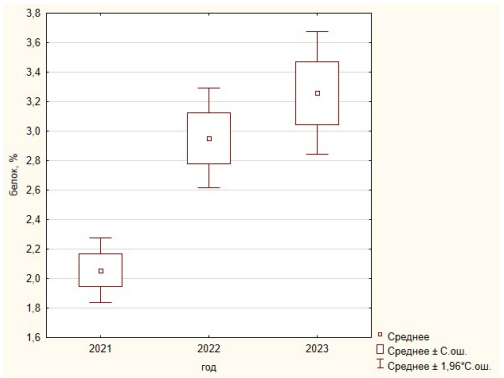
г



д



е



ж

Рис. 4. Изменчивость биохимического состава образцов топинамбура в 2021–2023 гг. по содержанию:
а – сухого вещества; **б** –инулина; **в** – аскорбиновой кислоты; **г** – суммы сахаров; **д** – антоцианов;
е – общей кислотности; **ж** – белка

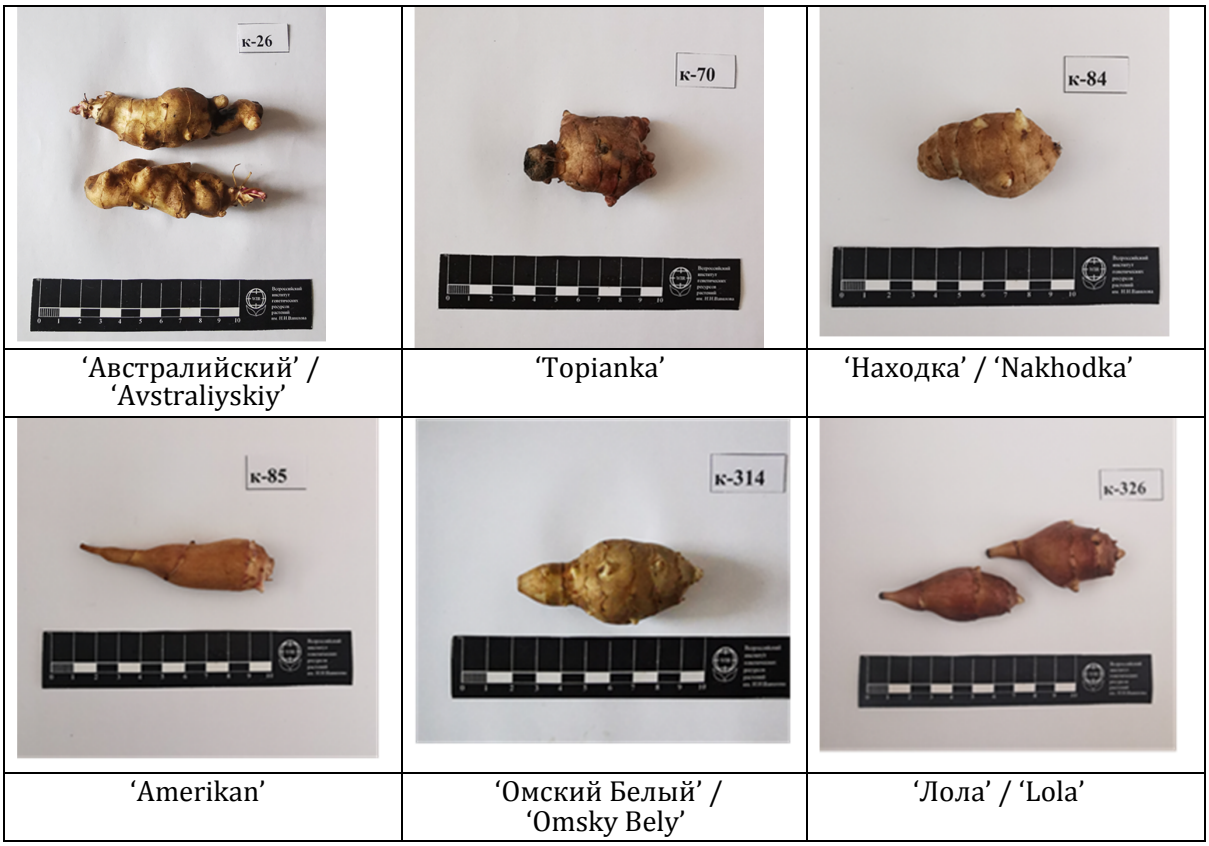
Fig. 4. Variability of biochemical composition in Jerusalem artichoke in 2021–2023 according to:
а – dry matter; **б** – inulin; **в** – ascorbic acid; **г** – total sugars; **д** – anthocyanins; **е** – total acidity; **ж** – protein

64%, тогда как содержание аскорбиновой кислоты было в 2022 г. больше на 35% по сравнению с 2021 г. и на 53% по сравнению с 2023 г. (см. рис. 4, в, е). Содержание белка в 2023 г. по сравнению с 2021 г. увеличилось на 58% (см. рис. 4, ж).

Среди изученных образцов топинамбура различия по содержанию сухого вещества достоверны, критерий Фишера $F = 2,9$ ($p < 0,01$), влияние фактора «сорт» 25%. Клубни сортов 'Тамбовский Красный', 'Австралийский' (рис. 5), 'Лола' (см. рис. 5, е) и образца 2051 содержат более 26% сухого вещества. Высокое содержание инулина (13,2–14,1%) выявлено у сортов 'Topianka' (см. рис. 5), 'Waldspindel', 'Австралийский', 'Зори Кавказа' и 'Лола', аскорбиновой кислоты (18,03 мг/100 г) – у сорта 'Толбухин', суммы сахаров (17,14–19,02%) – у сортов 'Тамбовский Красный' и 'Лола', моносахаров (2,20–2,32%) – у сортов 'Омский Белый' (см. рис. 5) и 'Киевский Белый'. У сорта 'Австралийский' обнаружено самое высокое содержание белка – 3,66% (табл. 3). Отличия по содержанию сухого вещества у сорта 'Тамбовский Красный', инулина у сортов 'Topianka', 'Waldspindel', 'Австралийский', 'Зори Кавказа' и 'Лола', суммы сахаров у сорта 'Лола' и белка у сорта 'Австралийский' статистически значимы (см. табл. 3). Клубни сорта-стандарта 'Омский Белый' по химическому составу не имеют существенных отличий от средних значений этих показателей у исследованной выборки образцов топинамбура. Следует отметить образец 'Amerikan' (см. рис, 5), который по продуктивности и биохимическому составу клубней не уступал сорту-стандарту 'Омский Белый' и который может представлять потенциальный интерес для промышленного возделывания в регионе.

Общая кислотность у образцов топинамбура варьировала (0,22–0,43%), самый большой диапазон по этому показателю установлен у сорта 'Толбухин': от 0,22% в 2022 г. до 0,81% в 2023 г. У образцов 'Сахалинский Красный', 'Progress', 'Зори Кавказа', 'Лола' и 'Омский Белый' показатель общей кислотности мало изменялся в годы исследования и составил 0,22–0,35%.

Сорта топинамбура заметно различаются по содержанию антоцианов в кожуре клубней: среднее значение показателя по данным трех лет варьирует от 3,72 до 16,82 мг/100 г. Высокая изменчивость этого показателя в годы исследования (V = 74%) указывает на неоднородность проб клубней, взятых для анализа. Нами отмечена нестабильность проявления антоциановой окраски клубней у некоторых образцов в исследованной выборке. Согласно морфологическим описаниям образцов топинамбура в коллекции ВИР среди исследованных нами сортов у девяти антоциановая окраска клубней отсутствует или слабо выражена, у одного – средней интенсивности и у остальных девяти – сильная или очень сильная (см. табл. 1). В нашем исследовании в 2021–2023 гг. отмечена более слабая окраска клубней у образцов 'Amerikan', 'Topianka', 'Violet de Rennes', 'Waldspindel', 'Горно-Алтайский', 'Лола', 'Сахалинский Красный' и 'Тамбовский Красный'. У сорта 'Violet de Rennes' ежегодно отмечали интенсивную окраску клубней, но малое содержание антоцианов (4,35 мг/100 г.) найдено в 2021 г. и высокое (22,2–23,9 мг/100 г) – в два последующих года. У сорта 'Зори Кавказа' содержание антоцианов в 2022 и 2023 г. составило 12,5 мг/100 г и 28,5 мг/100 г клубней соответственно. У сорта 'Лола' с интенсивной окраской клубней содержание антоцианов в годы изучения было



'Австралийский' / 'Avstraliyskiy'	'Topianka'	'Находка' / 'Nakhodka'
'Amerikan'	'Омский Белый' / 'Omsky Bely'	'Лола' / 'Lola'

Рис. 5. Клубни сортов топинамбура с номерами каталога ВИР (фото Н. В. Лебедевой)

Fig. 5. Tubers of Jerusalem artichoke cultivars with VIR catalogue numbers (photos by N. V. Lebedeva)

Таблица 3. Биохимический состав образцов топинамбура на Майкопской опытной станции ВИР в 2021–2023 гг.

Table 3. Biochemical composition of Jerusalem artichoke accessions at Maikop Experiment Station of VIR in 2021–2023

Образец	Сухой вес, %	Инулин, %	Аскорбиновая кислота, мг/100 г	Антоцианы, мг/100 г	Сумма сахаров, %	Белок, %
'Омский Белый' (стандарт)	23,69 ± 1,46	12,45 ± 1,65	16,04 ± 2,49	7,63 ± 4,60	14,69 ± 1,43	2,75 ± 0,43
'Amerikan'	24,63 ± 1,42	10,95 ± 0, 91	15,37 ± 1,12	8,47 ± 1,16	14,81 ± 1,05	3,06 ± 0,55
'Běloslupké'	22,10 ± 0,66	10,02 ± 1,08	13,50 ± 4,27	15,11 ± 5,83	12,53 ± 0,77[б]	2,43 ± 0,45
'Progress'	23,86 ± 2,34	11,10 ± 2,61	15,13 ± 2,38	9,27 ± 5,04	14,08 ± 1,84[б]	2,56 ± 0,33
'Topianka'	23,30 ± 1,42	**13,43 ± 2,06[а]**	14,26 ± 0,87	11,84 ± 4,44	15,21 ± 2,13	3,23 ± 1,34
'Violet de Rennes'	21,57 ± 0,76[б]	7,78 ± 1,83[б]	14,40 ± 1,66	16,82 ± 6,26	12,32 ± 1,79[б]	2,45 ± 0,49
'Waldspindel'	25,90 ± 0,54	**13,32 ± 1,60[а]**	15,07 ± 1,27	12,88 ± 5,22	16,17 ± 0,84	2,98 ± 0,49
'Австралийский'	26,12 ± 0,59	**14,10 ± 1,41[а]**	17,71 ± 3,36	7,02 ± 2,83	15,24 ± 1,77	**3,65 ± 0,67[а]**
'Белый Урожайный'	22,09 ± 0,67	11,29 ± 2,13	15,9 ± 3,05	9,29 ± 6,59	14,26 ± 1,52[б]	2,11 ± 0,24[б]
'Венгерский'	24,36 ± 0,61	12,10 ± 0,73	12,27 ± 1,34	3,72 ± 1,91	14,60 ± 0,79[б]	3,50 ± 0,45
'Горно-Алтайский'	25,30 ± 2,1	10,40 ± 3,62	13,94 ± 1,83	12,06 ± 7,38	15,06 ± 1,97	3,09 ± 0,81
'Зори Кавказа'	24,08 ± 0,64	**13,22 ± 0,93[а]**	12,46 ± 1,15	13,51 ± 8,26	15,10 ± 1,02	2,92 ± 0,22
'Киевский Белый'	23,77 ± 0,30	11,92 ± 0,65	14,29 ± 3,10	9,59 ± 2,81	14,68 ± 0,55	2,03 ± 0,31[б]
'Лола'	26,62 ± 0,37	**13,73 ± 1,28[а]**	15,69 ± 3,74	7,77 ± 1,13	**19,02 ± 3,48[а]**	2,09 ± 0,12[б]
'Находка'	20,93 ± 0,63[б]	10,43 ± 0,97	17,33 ± 1,34	11,53 ± 5,79	12,13 ± 0,89[б]	2,16 ± 0,03[б]
'Сахалинский Красный'	22,54 ± 0,17	11,70 ± 0,57	13,35 ± 2,24	8,13 ± 3,46	13,74 ± 0,84[б]	2,27 ± 0,11
'Тамбовский Красный'	**27,66 ± 0,60[а]**	12,06 ± 1,61	16,05 ± 3,04	10,53 ± 4,89	17,13 ± 0,08	3,14 ± 0,51
'Толбухин'	25,86 ± 1,77	8,89 ± 2,62	18,03 ± 1,98	10,40 ± 6,13	11,95 ± 1,16[б]	3,46 ± 0,09
2051	26,44 ± 0,40	12,02 ± 2,66	14,98 ± 1,88	13,16 ± 2,35	13,88 ± 1,83[б]	2,45 ± 0,33

Примечание: [а, б] – отмечены группы, различия между которыми по среднему значению показателя за три года изучения (2021–2023 гг.) статистически значимы при $p < 0,05$

Note: [a] and [b] marks mean that the differences between the groups in the average value of the indicator for three years of study (2021–2023) are statistically significant at $p < 0.05$

невелико (6,04–9,89 мг/100 г). У сорта 'Běloslupké' содержание антоцианов сильно варьировало за три года исследования.

Обсуждение

Изучение отобранных 19 образцов топинамбура установило сортовые различия по продуктивности и биохимическому составу клубней. Ранее при исследовании коллекции топинамбура ВИР также было выявлено значительное варьирование по продуктивности клубней: от 0,63 до 2,08 кг/раст. (Kiru, Nasenko, 2010). В наших опытах продуктивность сорта 'Находка' (см. рис. 5) в 2022 г., как и в 2010 г., была средней, составила 1,74 кг/раст., в 2023 г. – высокой, составила 2,68 кг/раст. Топинамбур 'Находка' на Майкопской ОС возделывают на протяжении более полувека, и в благоприятных условиях продуктивность образца по-прежнему высокая, соответствует продуктивности 2,4–2,8 кг/куст, отмеченной в 1970-е годы (Pasko, 1974). Однако в наших опытах, по сравнению с ранее полученными результатами, у образцов 'Тамбовский Красный', 'Горно-Алтайский' и 'Венгерский' меньше содержание общих сахаров в клубнях: 17,13%, 15,06% и 14,6% соответственно, по сравнению с данными оценки в 70-е годы прошлого столетия: 20,1%, 19,9% и 20,5% (Pasko, 1974). Тем не менее образцы топинамбура, длительный период возделываемые путем вегетативного воспроизводства без существенного снижения продуктивности ('Находка'), с высоким содержанием сухого ве-

щества (‘Тамбовский Красный’), целесообразно использовать в селекционной работе.

Сорта топинамбура, культивируемые на опытном поле ГНУ «Центральный ботанический сад НАН Беларуси», по продуктивности уступают образцам из коллекции ВИР. В наших опытах у сортов ‘Violet de Rennes’ и ‘Киевский Белый’ получено с одного растения 2,20–2,67 кг клубней, тогда как в Беларуси – 0,45 и 2,14 кг/раст. соответственно (Leontiev et al., 2014). Продуктивность сортов топинамбура при возделывании в Адыгее выше, чем в условиях Западной Сибири, где у сортов ‘Находка’ и ‘Киевский Белый’ получено с одного растения лишь по 0,78 кг клубней, у сорта ‘Омский Белый’ – 1,20 кг клубней (Khristich et al., 2015). Возможно, что причиной низкой продуктивности топинамбура в Беларуси и Западной Сибири является более короткий период вегетации. Учет продуктивности в наших опытах сделан ранней весной, тогда как другие исследователи проводили учеты в октябре. Вероятно, в условиях мягких зим Северо-Кавказского региона у растений топинамбура продолжается постепенный отток пластических веществ из наземной части растений в клубни, обеспечивая постепенное накопление урожая.

В наших опытах отбор клубней для биохимического анализа производился, как и другими исследователями, в октябре. Биохимический состав клубней у сортов ‘Омский Белый’ и ‘Находка’ при возделывании в Адыгее был лучше, чем в Западной Сибири, где содержание инулина у этих сортов составило 3,9 и 7,95 % (в наших опытах – 12,11 и 10,43%), содержание белка – 1,6% (в наших опытах – 2,75 и 2,16%) и сахаров – 4,3 и 8,8% (в наших опытах –14,6 и 12,13%) (Khristich et al., 2015). Очевидно, что причиной выявленных различий в содержании химических компонентов является сортовая реакция топинамбура на условия произрастания. Заметное влияние условий года на содержание химических веществ в клубнях топинамбура установлено многими авторами (Kahana, Arasimovich, 1974; Kosaric et al., 1984; Sawicka et al., 2021). Отмечено, что содержание инулина и суммы всех сахаров может изменяться у одного и того же сорта в зависимости от года в два и более раз (Kosaric et al., 1984). Наши результаты доказывают, что единственный показатель, который мало подвержен влиянию среды и определяется сортовыми особенностями, – это содержание сухого вещества. Содержание остальных соединений: сахаров, инулина, органических кислот, аскорбиновой кислоты, антоцианов варьирует в широких пределах. Необходимо продолжение исследований для установления оптимальных условий накопления инулина и других биологически активных веществ у топинамбура. Наши результаты, в частности, противоречат ранее сделанным выводам о благоприятном влиянии на накопление инулина и общего количества сухих веществ жаркого и сухого периода во вторую половину лета в Молдавии (Kahana, Arasimovich, 1974). В наших опытах самый жаркий и сухой период второй половины лета был в 2023 г., и тогда же отмечено самое низкое содержание инулина.

Большинство исследователей анализировали химический состав клубней топинамбура по небольшому числу показателей: содержанию сухих веществ, инулина, сахаров и витамина С (Liu et al., 2011; Manokhina et al., 2022; Dima et al., 2023). Лишь для ограниченного числа сортов топинамбура опубликованы результаты детального биохимического анализа клубней по содержанию сухого вещества, клетчатки, жиров, протеина, инулина, аскорбиновой кислоты, органических кислот, по аминокислотному составу, макро- и микроэлементам (Rupasova et al., 2015; Sawicka et al., 2020; Sawicka et al., 2021). Сравнение наших результатов с данными литературы позволяет сделать вывод о том, что сорта топинамбура, возделываемые в коллекции ВИР в изученном регионе, по биохимическому составу не уступают сортам топинамбура, возделываемым в европейских странах. По содержанию сухого вещества (более 26%) образцы топинамбура (‘Тамбовский Красный’, ‘Австралийский’, ‘Лола’ и 2051) на Майкопской ОС не уступают, а по содержанию сахаров (до 19%, ‘Тамбовский Красный’ и ‘Лола’) и аскорбиновой кислоты (до 17–18 мг/100 г, ‘Толбухин’) превосходят сорта, которые возделывают в Литве и Польше – ‘Albik’ и ‘Rubik’ (Danilcenko et al., 2017; Sawicka et al., 2020; Sawicka et al., 2021). Выход главного биохимического компонента – инулина, а также содержание белка, сухого вещества, суммы сахаров достаточно высоки и свидетельствуют о пищевой ценности выделенных сортов топинамбура.

Органические кислоты содержатся почти во всех свежих плодах и овощах. Они играют важную роль в обмене веществ растений, являются в основном продуктами превращения сахаров, принимают участие в биосинтезе алкалоидов, гликозидов, аминокислот и других биологически активных соединений, служат связующим звеном между отдельными стадиями обмена жиров, белков и углеводов. В клубнях топинамбура содержание органических кислот соответствует этому показателю у овощных культур – капуста, лук репчатый, огурцы свежие, перец сладкий содержат от 0,1 до 0,3 г на 100 г съедобной части (Metlitsky, 1970). В среднем за три года изучения показано, что клубни изученных образцов содержат 0,3% свободных органических кислот.

Антоцианы представляют собой полифенольные соединения, которые придают различную окраску генеративным и вегетативным органам растений. Основная их функция у растений – повышение устойчивости к воздействию неблагоприятных природных факторов, микроорганизмов, вызывающих болезни растений, и вредителей. В данной статье не проводится сопоставление полученных нами данных с ранее опубликованными результатами других исследований, поскольку такие исследования малочисленны и проводились на малых выборках или на других культурах. Так, в работе корейских исследователей (Jung et al., 2016) содержание антоцианов оценивали в выборке из трех образцов топинамбура, что не позволяет корректно произвести сравнение с нашими результатами. Среднее содержание антоцианов в клубнях топинамбура за три года изучения составило 10,46 мг/100 г. В статье А. Е. Соловьевой с соавторами (Solovyeva et al., 2024) оценивалось содержание антоцианов в клубнях картофеля после сбора урожая: оно составляло в среднем 19,75 мг/100 г, что почти вдвое выше, чем в клубнях топинамбура, согласно результатам нашего исследования.

Заключение

Впервые образцы коллекции топинамбура ВИР оценены по комплексу показателей, характеризующих биохимический состав клубней и содержание в них биологически активных веществ. В результате сравнительного исследования клубней 19 образцов топинамбура (урожай 2021–2023 гг.) по продуктивности, содержанию сухого вещества, углеводов с учетом инулина, белка, органических кислот, аскорбиновой кислоты, антоцианов пока-

зана изменчивость признаков в зависимости от сортовой принадлежности растений и метеоусловий периода вегетации. Установлено, что генотип определяет содержание сухого вещества в клубнях и этот показатель у изученных образцов топинамбура слабо варьирует в годы, контрастные по тепло- и влагообеспеченности. Содержание инулина, суммы сахаров и белка определяется как сортовыми особенностями, так и условиями периода вегетации. Содержание аскорбиновой кислоты, антоцианов и органических кислот в основном зависело от метеоусловий. Представляет большое интерес дальнейшее изучение влияния внешних факторов (метеоусловий и продолжительности периода вегетации) на продуктивность и качество клубней топинамбура в условиях Северного Кавказа.

По итогам биохимического изучения клубней топинамбура можно рекомендовать их в качестве сырья для создания продуктов функционального назначения (по содержанию сухих веществ, свободных органических и аскорбиновой кислот, растворимых сахаров, инулина, антоцианов), которые содержат физиологически активные, ценные и безопасные ингредиенты с известными физико-химическими характеристиками, с выявленными и научно обоснованными полезными свойствами для сохранения и улучшения здоровья. В коллекции топинамбура ВИР выделены образцы с высокой и стабильной продуктивностью клубней, ценным биохимическим составом, высоким содержанием биологически активных соединений (инулина, аскорбиновой кислоты) и питательных веществ (белка). Среднеспелый сорт 'Австралийский' отличается высокой продуктивностью (на уровне сорта-стандарта) и максимальным содержанием инулина и белка в клубнях по сравнению с остальными изученными образцами топинамбура. Для возделывания на пищевые цели перспективен образец 'Amerikan', который по продуктивности и биохимическому составу клубней соответствует сорту-стандарту. Как исходный материал в селекции на продуктивность следует использовать образец 'Находка', в селекции на высокое содержание сухого вещества – 'Тамбовский Красный'. Полученные характеристики 19 образцов топинамбура из коллекции ВИР важны для повышения эффективности селекционной работы с топинамбуром, имеют большое практическое значение для расширения площадей возделывания в Российской Федерации и производства функциональных продуктов этой пищевой культуры.

References / Литература

Chupakhina G.N., Maslennikov P.V. (comp.). Methods of vitamin analysis: a practicum (Metody analiza vitaminov: praktikum). Kaliningrad: Kaliningrad State University; 2004. [in Russian] (Методы анализа витаминов: практикум / сост. Чупахина Г.Н., Масленников П.В. Калининград: Калининградский государственный университет; 2004). DOI: 10.13140/2.1.1147.7449

Danilcenko H., Jariene E., Slepetiene A., Sawicka B., Zaldariene S. The distribution of bioactive compounds in the tubers of organically grown Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) during the growing period. *Acta Scientiarum Polonorum. Hortorum Cultus*. 2017;16(3):97-107. DOI: 10.24326/asphc.2017.3.10

Diederichsen A. Phenotypic diversity of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) germplasm preserved by the Canadian genebank. *Helia*. 2010;33(53):1-16. DOI: 10.2298/hel1053001d

Dima M., Diaconu A., Paraschivu M., Cotuna O., Sărăţeanu V., Bonciu E. et al. The impact of cultivation system on nutritional quality of Jerusalem artichoke tubers cultivated in semiarid marginal areas. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 2023;51(2):13210. DOI: 10.15835/nbha51213210

Ermakov A.I., Arasimovich V.V., Smirnova-Ikonnikova M.I., Murri I.K. Methods of biochemical research in plants (Metody biokhimicheskogo issledovaniya rasteniy). Moscow; Leningrad: State Publishers of Agricultural literature; 1952. [in Russian] (Ермаков А.И., Арасимович В.В., Смирнова-Иконникова М.И., Мурри И.К. Методы биохимического исследования растений. Москва; Ленинград: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы; 1952).

Ermakov A.I., Arasimovich V.V., Yarosh N.P., Peruanskiy Yu.V., Lukovnikova G.A., Ikonnikova M.I. Methods of biochemical research in plants (Metody biokhimicheskogo issledovaniya rasteniy). A.I. Ermakov (ed.). 3rd ed. Leningrad: Agropromizdat; 1987. [in Russian] (Ермаков А.И., Арасимович В.В., Ярош Н.П., Перуанский Ю.В., Луковникова Г.А., Иконникова М.И. Методы биохимического исследования растений / под ред. А.И. Ермакова. 3-е изд. Ленинград: Агропромиздат; 1987).

GOST 13496.4-2019. Interstate standard. Fodder, mixed fodder and raw mixed fodder. Methods of nitrogen and crude protein determination. Moscow: Standartinform; 2019. [in Russian] (ГОСТ 13496.4-2019. Межгосударственный стандарт. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания азота и сырого протеина. Москва: Стандартинформ; 2019). URL: https://docs.cntd.ru/document/1200166800 [дата обращения: 15.03.2025].

GOST 24556-89. Interstate standard. Products of fruits and vegetables processing. Methods for determination of vitamin C. Moscow: Standartinform; 1989. [in Russian] (ГОСТ 24556-89. Межгосударственный стандарт. Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения витамина С. Москва: Стандартинформ; 1989). URL: https://docs.cntd.ru/document/1200022765 [дата обращения: 15.03.2025].

GOST 26176-2019. Interstate standard. Fodders, mixed feeds. Methods for determination of soluble and hydrolysable carbohydrates. Moscow: Standartinform; 2020. [in Russian] (ГОСТ 26176-2019. Межгосударственный стандарт. Корма, комбикорма. Методы определения растворимых и легкогидрализуемых углеводов. Москва: Стандартинформ; 2020). URL: https://docs.cntd.ru/document/1200166802 [дата обращения: 15.03.2025].

GOST 33977-2016. Interstate standard. Fruit and vegetable products. Methods for determination of total solids content. Moscow: Standartinform; 2019. [in Russian] (ГОСТ 33977-2016. Межгосударственный стандарт. Продукты переработки фруктов и овощей. Методы определения общего содержания сухих веществ. Москва: Стандартинформ; 2019). URL: https://docs.cntd.ru/document/1200144956 [дата обращения: 15.03.2025].

Hanci F. An outlook of the world Jerusalem artichoke market. In: *ISPEC 13. International Conference on Agriculture, Animal Science and Rural Development: Conference Proceeding Book*. Uşak: Uşak University; 2023. p.1463-1474.

Jung W.Y., Lee S.S., Park H.J., Kim C.W., Kwon S.Y., Jeon J.H. et al. Comparative transcriptome profiling and SSR marker identification in three Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) cultivars exhibiting phenotypic variation. *Plant*

Biotechnology Reports. 2016;10(6):447-461. DOI: 10.1007/s11816-016-0421-8

Kahana B.M., Arasimovich V.V. Biochemistry of Jerusalem artichoke (Biokhimiya artishoka). Chisinau: Ştiinţa; 1974. [in Russian] (Кахана Б.М., Арасимович В.В. Биохимия топинамбура. Кишинев: Штиинца; 1974).

Khristich V.V., Kumpan V.N., Prokhorova N.A., Kling A.P., Chupina M.P. The research of *Helianthus tuberosus* in the conditions of subtaiga zone West Siberia. *Vestnik of Omsk SAU*. 2015;4(20):19-23. [in Russian] (Христич В.В., Кумпан В.Н., Прохорова Н.А., Клинг А.П., Чупина М.П. Сортоизучение топинамбура в условиях подтаежной зоны Западной Сибири. *Вестник Омского ГАУ*. 2015;4(20):19-23).

Kiru S.; Nasenko I. Use of genetic resources from Jerusalem artichoke collection of N. Vavilov Institute in breeding for bioenergy and health security. *Agronomy Research*. 2010;8(Special Issue III):625-632.

Kosaric N., Cosentino G.P., Wieczorek A., Duvnjak Z. The Jerusalem artichoke as an agricultural crop. *Biomass*. 1984;5(1):1-36. DOI: 10.1016/0144-4565(84)90066-0

Lebedeva N.V., Smekalova T.N., Lyubchenko A.V. Catalogue of the VIR global collection, Issue 900. Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.): Jerusalem artichoke accessions of foreign origin (Topinambur [*Helianthus tuberosus* L.]: Obraztsy topinambura inostrannogo proiskhozhdeniya). St. Petersburg: VIR; 2019. [in Russian] (Лебедева Н.В., Смекалова Т.Н., Любченко А.В. Каталог мировой коллекции ВИР. Выпуск 900. Топинамбур (*Helianthus tuberosus* L.). Образцы топинамбура иностранного происхождения. Санкт-Петербург: ВИР; 2019). DOI: 10.30901/978-5-907145-30-6

Leontiev V.N., Titok V.V., Dubar D.A., Ignatovets O.S., Lugin V.G., Feskova E.V. Inulin from Jerusalem artichoke: biosynthesis, structure, properties, application (Inulin iz topinambura: biosintez, struktura, svoystva, primeneniye). *Proceedings of the Belarusian State University. Series of Physiological, Biochemical and Molecular Biology Sciences*. 2014;9(1):181-185. [in Russian] (Леонтьев В.Н., Титок В.В., Дубарь Д.А., Игнатовец О.С., Лугин В.Г., Феськова Е.В. Инулин из топинамбура: биосинтез, структура, свойства, применение. *Труды Белорусского государственного университета. Серия: Физиологические, биохимические и молекулярные основы функционирования биосистем*. 2014;9(1):180-185).

Liava V., Karkanis A., Danalatos N., Tsiropoulos N. Cultivation practices, adaptability and phytochemical composition of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.): A weed with economic value. *Agronomy*. 2021;11(5):914. DOI: 10.3390/agronomy11050914

Liu Z.X., Han L.P., Steinberger Y., Xie G.H. Genetic variation and yield performance of Jerusalem Artichoke germplasm collected in China. *Agricultural Sciences in China*. 2011;10(5):668-678. DOI: 10.1016/S1671-2927(11)60049-7

Manokhina A.A., Dorokhov A.S., Kobozeva T.P., Fomina T.N., Starovoitov V.I. Jerusalem artichoke as a strategic crop for solving food problems. *Agronomy*. 2022;12(2):465. DOI: 10.3390/agronomy12020465

Metlitsky L.V. Biochemistry of fruits and vegetables: monograph. Moscow: Ekonomika; 1970. [in Russian] (Метлицкий Л.В. Биохимия плодов и овощей: монография. Москва: Экономика; 1970).

Pasko N.M. Jerusalem artichoke breeding in the USSR. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 1974;53(1):231-244. [in Russian] (Пасько Н.М. Селекция топинамбура в СССР. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1974;53(1):231-244).

Puttha R., Jogloy S., Wangsomnuk P.P., Srijaranai S., Kesmala T., Patanothai A. Genotypic variability and genotype by environment interactions for inulin content of Jerusalem artichoke germplasm. *Euphytica*. 2012;183(1):119-131. DOI: 10.1007/s10681-011-0520-0

Rossini F., Provenzano M.E., Kuzmanović L., Ruggeri R. Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.): a versatile and sustainable crop for renewable energy production in Europe. *Agronomy*. 2019;9(9):528. DOI: 10.3390/agronomy9090528

Rupasova Zh.A., Vasileuskaya T.I., Krinitskaya N.B., Bubnova A.M., Veyevnik A.A., Kuptsov N.S. et al. Biochemical composition of Jerusalem artichoke tubers from the collection of the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological Series*. 2015;(4):23-28. [in Russian] (Рупасова Ж.А., Василевская Т.И., Криницкая Н.Б., Бубнова А.М., Веевник А.А., Купцов Н.С., Попов Е.Г. Пашкевич П.А., Дубарь Д.А. Биохимический состав клубней топинамбура из коллекции Центрального ботанического сада НАН Беларуси. *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия биологических наук*. 2015;(4):23-28).

Sawicka B., Danilcenko H., Jariene E., Skiba D., Rachoń L., Barbaś P. et al. Nutritional value of Jerusalem artichoke tubers (*Helianthus tuberosus* L.) grown in organic system under Lithuanian and Polish conditions. *Agriculture*. 2021;11(5):440. DOI: 10.3390/agriculture11050440

Sawicka B., Skiba D., Pszczółkowski P., Aslan I., Sharifi-Rad J., Krochmal-Marczak B. Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) as a medicinal plant and its natural products. *Cellular and Molecular Biology*. 2020;66(4):160-177. DOI: 10.14715/cmb/2020.66.4.20

Serieys H., Souyris I., Gil A., Poinso B., Bervillé A. Diversity of Jerusalem artichoke clones (*Helianthus tuberosus* L.) from the INRA-Montpellier collection. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2010;57(8):1207-1215. DOI: 10.1007/s10722-010- 9560-x

Smekalova T.N., Lebedeva N.V., Novikova L.Yu. Morphological analysis of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) accessions of different origin from VIR collection. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences*. 2019;73(6):502-512. DOI: 10.2478/prolas-2019-0077

Solovyeva A., Rogozina E., Chalaya N., Sitnikov M. Biochemical composition of tubers of new Russian potato cultivars. *Agronomy*. 2024;14(4):834. DOI: 10.3390/agronomy14040834

State Register for Selection Achievements Admitted for Usage: [website]. [in Russian] (Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию: [сайт]). URL: https://reestr.gossortrf.ru [дата обращения: 14.03.2025].

Terzić S., Boniface M.C., Marek L., Alvarez D., Baumann K., Gavrilova V. et al. Gene banks for wild and cultivated sunflower genetic resources. *Oilseeds and Fats, Crops and Lipids*. 2020;27(10):9. DOI: 10.1051/ocl/2020004

Wangsomnuk P.P., Khampa S., Jogloy S., Srivong T., Patanothai A., Fu Y.B. Assessing genetic structure and relatedness of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) germplasm with RAPD, ISSR and SRAP markers. *American Journal of Plant Sciences*. 2011;2(6):753-764. DOI: 10.4236/ajps.2011.26090

Информация об авторах

Наталья Васильевна Лебедева, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, n.lebedeva@vir.nw.ru, https://orcid.org/0009-0007-6184-0598

Александр Васильевич Любченко, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Майкопская опытная станция – филиал ВИР, 385746 Россия, Республика Адыгея, Майкопский район, пос. Подгорный, ул. Научная, 1, alexandrlyubchenko@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-2996-8192

Алла Евгеньевна Соловьева, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, alsol64@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-6201-4294

Ирина Викторовна Варганова, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, i.varganova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-5054-6410

Елена Вячеславовна Рогозина, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, rogozinaelena@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-2743-068x

Information about the authors

Natalia V. Lebedeva, Associate Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, n.lebedeva@vir.nw.ru, https://orcid.org/0009-0007-6184-0598

Alexandr V. Lyubchenko, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Maikop Experiment Station – branch of VIR, 1 Nauchnaya St., Podgorny Settlem., Maikop District 385746, Republic of Adygea, Russia, alexandrlyubchenko@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-2996-8192

Alla E. Solovyeva, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, alsol64@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-6201-4294

Irina V. Varganova, Associate Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, i.varganova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-5054-6410

Elena V. Rogozina, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, rogozinaelena@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-2743-068x

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 08.04.2025; одобрена после рецензирования 04.06.2025; принята к публикации 14.07.2025.
The article was submitted on 08.04.2025; approved after reviewing on 04.06.2025; accepted for publication on 14.07.2025.

ГЕНЕТИКА КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 575.1:575.2
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-187-198

CC BY

Закон Вавилова в эпоху секвенирования нового поколения: ответы, загадки, подсказки

Е. К. Хлесткина

Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Елена Константиновна Хлесткина, director@vir.nw.ru

С момента доклада Н. И. Вавилова в Саратове 4 июня 1920 г. закон гомологических рядов в наследственной изменчивости не только нашел воплощение в селекционной практике при целенаправленном поиске новых источников, но и сыграл важную роль в развитии создаваемой коллекции мировых генетических ресурсов растений. Механизмы, лежащие в основе выявленных рядов, раскрывались с развитием подходов фундаментальной науки: сперва в исследовании цитогенетическими методами, затем в ходе молекулярно-генетического картирования генов и, наконец, с помощью сравнительной геномики в эпоху NGS (секвенирования нового поколения). Очевидным объяснением закона, сформулированного Вавиловым, кажется генетическое сходство организмов, их общее происхождение. При этом, в свете подробно задокументированной на сегодняшний день синтении геномов, закон Вавилова широко используется в исследованиях в области частной генетики культурных растений, а также при создании доноров ценных для селекции признаков. Применяется закон и при улучшении генотипов растений при помощи направленного мутагенеза. В статье приводятся конкретные примеры таких работ, а также примеры, подтверждающие связь гомологических рядов в наследственной изменчивости с синтенией геномов. Обсуждаются решенные (или пока еще не решенные) загадки «пробелов» в гомологических рядах или их неожиданного «прерывания» в череде относительно близких таксонов. С накоплением результатов этих исследований выявилось, что нередко в основе гомологических рядов лежит конвергенция, а не синтения. Естественный отбор часто использует разные гены и разные мутации для «достижения» одного и того же результата у разных видов. Такое «быстрое решение» особенно ценно для выживания вида в резко меняющихся условиях окружающей среды. Конвергенция является результатом адаптации к неблагоприятным условиям, когда естественный отбор «использует» ранее нейтральные мутации, которые становятся важными для адаптации в изменившейся среде. Сегодня, сталкиваясь с вызовами меняющегося климата и нестабильных погодных условий, важно применить эти подсказки природы и адаптировать данный механизм для селекции. Обсуждаются возможности применения направленного мутагенеза для создания разнообразия мутантных форм на основе многочисленных неактивных дупликаций генов в геномах культурных растений для дальнейшего тестирования в различных стрессовых условиях. Возможно и целенаправленное перепрограммирование дуплицированных копий при помощи редактирования под будущие условия окружающей среды. Однако эта стратегия требует предварительного анализа больших данных, накопленных по генным и метаболическим сетям, а также фенотипических данных в различных условиях среды. Частично такие данные уже накоплены при многолетнем изучении коллекции ВИР в различных эколого-географических условиях. Совместные усилия селекционеров, генетиков, биоинформатиков, генных инженеров, специалистов по генетическим ресурсам растений могут обеспечить реализацию принципиально новой стратегии по улучшению возделываемых растений посредством моделирования естественных процессов адаптации и целенаправленного использования дупликаций генов.

Ключевые слова: большие данные, Н. И. Вавилов, генетика растений, генетические ресурсы растений, геном, дупликации генов, изменение климата, коллекции, конвергенция, направленный мутагенез, секвенирование нового поколения, синтения, технологическое лидерство, эволюция

Благодарности: работа выполнена в рамках госзадания ВИР (FGEM-2025-0009).
Автор благодарит доктора биологических наук Анисимову Ирину Николаевну за ценные замечания и обсуждение в ходе подготовки работы.
Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Хлесткина Е.К. Закон Вавилова в эпоху секвенирования нового поколения: ответы, загадки, подсказки. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(3):187-198. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-187-198

© Хлесткина Е.К., 2025

GENETICS OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-187-198

Vavilov's law in the era of next-generation sequencing: answers, puzzles, hints

Elena K. Khlestkina

N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: Elena K. Khlestkina, director@vir.nw.ru

Since N. I. Vavilov's report in Saratov on June 4, 1920, the Law of Homologous Series in Hereditary Variation has not only found practical application in the targeted search for new sources for breeding, but also played an important role in the development of the global plant genetic resources collection. Mechanisms underlying the series observed were progressively revealed with the development of approaches in fundamental science: first in research with cytogenetic methods, then in the course of molecular genetic mapping of genes, and finally with the help of comparative genomics in the era of Next-Generation Sequencing (NGS). The obvious explanation for the Law formulated by Vavilov seems to be the genetic similarity of organisms, their common origin. At the same time, in light of the currently well-documented synteny of genomes, Vavilov's law is widely used both in special genetics and for creation of donors of traits valuable for breeding. The Law is also applied for improving plant genotypes using targeted mutagenesis. The article provides specific examples of such research, as well as examples confirming the connection between homologous series in hereditary variation and the synteny of genomes. The solved (or not yet solved) puzzles of "gaps" in homologous series or their unexpected "interruption" in a series of relatively close taxa are discussed. It became clear with the accumulation of results of these studies that convergence, not only synteny, often underlies homologous series. Natural selection often uses different genes and different mutations to "achieve" the same result in different species. Such a "quick solution" is especially valuable for species surviving in rapidly changing environmental conditions. Convergence is the result of adaptation to unfavorable conditions, when natural selection "uses" previously neutral mutations that become important for adaptation in a changed environment. Today, faced with the challenges of changing climate and unstable weather conditions, it is important to apply these Nature's hints and adapt this mechanism for breeding. The possibilities of using targeted mutagenesis to make a diversity of mutant forms based on numerous inactive gene duplications in the crop genomes for further testing under various stress conditions are discussed. The editing-based targeted reprogramming of duplicated copies for future environmental conditions is also possible. However, this strategy requires preliminary analysis of big data accumulated on gene and metabolic networks, as well as phenotypic data under various environmental conditions. Some of such data have already been accumulated through long-term studies of the VIR collection under various ecogeographic conditions. Joint efforts of breeders, geneticists, bioinformaticians, genetic engineers, and plant genetic resources experts can ensure the implementation of a fundamentally new strategy for improving cultivated plants by modeling natural adaptation processes and targeted use of gene duplications.

Keywords: big data, N. I. Vavilov, plant genetics, plant genetic resources, genome, gene duplications, climate change, collections, convergence, targeted mutagenesis, next-generation sequencing, synteny, technological leadership, evolution

Acknowledgments: the study was conducted within the framework of the state task assigned to VIR (FGEM-2025-0009). The author is grateful to Dr. Irina N. Anisimova for valuable comments and discussions during the preparation of this review. The author thanks the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Khlestkina E.K. Vavilov's law in the era of next-generation sequencing: answers, puzzles, hints. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(3):187-198. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-187-198

4 июня 1920 г. в Саратове, в Большой физической аудитории Саратовского университета (ныне – Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, СГУ) состоялось значимое для мировой генетики событие. Николай Иванович Вавилов представил сформулированный им закон гомологических рядов в наследственной изменчивости (Vavilov, 1920, 1922). Закон в кратчайшие сроки нашел воплощение в практике при целенаправленном поиске новых источников для селекции (и пополнения ими мировой коллекции генетических ресурсов растений), а затем поступательно раскрывался с развитием подходов фундаментальной науки.

Логическим объяснением наблюдаемых серий было генетическое сходство организмов, их общее происхождение. Вскоре свидетельствами этому стали результаты многочисленных цитологических исследований, указывавшие на сходное или кратное число хромосом у близких таксонов (Levitsky, Kuzmina, 1927; Levitsky, 1929; Lewitsky, 1931; Lewitzky, 1940). Затем пришла пора цитогенетических исследований, появились методы дифференциального окрашивания хромосом, которые вместе с другими подходами изучения хромосом дали картину некоторых хромосомных перестроек и дополнили картину общности происхождения тех или иных участков хромосом близких видов и их отличие от более удаленных таксонов (Koller, Zeller, 1976; Naranjo et al., 1987; Naranjo, Fernández-Rueda, 1991).

В 1990-е годы, после появления первых ДНК-маркеров (а именно RFLP – Restriction Fragment Length Polymorphism) и построения первых молекулярных генетических карт, были уже в деталях описаны и перестройки, и колинеарность хромосом разных видов. На рисунке 1 схематически изображен геном ржи (*Secale cereale* L.) в сравнении с геномом гексаплоидной пшеницы (*Triticum aestivum* L.). Крупные транслокации наблюдаются в хромосомах 4R, 5R, 6R, 7R, относительно крупные – в хромосомах 2R и 3R (см. рис. 1). Хромосома 1R не содержит перестроек в сравнении с хромосомами первой гомеологичной группы пшеницы, тогда как в пределах каждого перестроенного участка остальных хромосом ржи выявлена колинеарность с соответствующим районом (участком) генома пшеницы (Devos et al., 1993).

Аналогичным образом при помощи сравнительного молекулярно-генетического картирования хромосом описаны, например, перестройки и колинеарность перестроенных участков между отдельными хромосомами кукурузы (*Zea mays* L.) и риса (*Oryza sativa* L.) (Ahn, Tanksley, 1993).

Также при помощи молекулярно-генетических методов, начиная с середины 1990-х гг., активно велось картирование генов (например, Paterson, Wing, 1993; Shibaike, 1998; Börner, 2002; Gostimsky et al., 2005; Khlestkina et al., 2009). Сравнение хромосомных карт родственных видов, несущих гены, контролирующие одинаковые признаки, позволило выявить гены-ортологи, контролирующие один и тот же признак у разных видов. На рисунке 2 представлены схемы хромосомных карт пшеницы (*Triticum* L. sp.), ржи и ячменя (*Hordeum vulgare* L.), включающих отдельные гены чувствительности к яровизации (*Vrn*), которые определяют тип развития (яровой / озимый) и сроки цветения. Гены-ортологи были соответствующим образом переименованы, чтобы подчеркнуть принадлежность к одному ортологическому ряду. На рисунке 2 новые названия представлены под первичными обозначениями генов. Такие ряды ортологичных генов очень хорошо объясняют феномен наблюдаемых параллельных рядов изменчивости.

В ряде случаев задокументированные ряды генов, связанные в происхождении с одним предковым геном (что подтверждено колинеарностью хромосом в районе их локализации, а затем и данными, полученными при

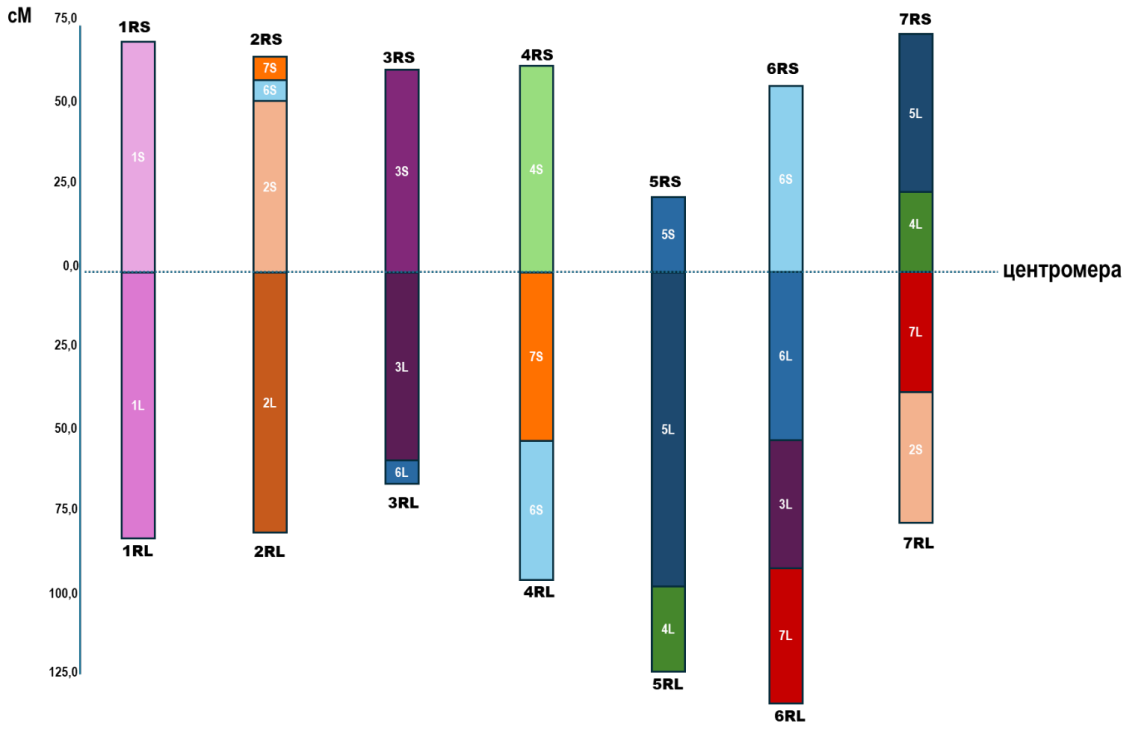


Рис. 1. Перестройка хромосом ржи в сравнении с хромосомами пшеницы (по Devos et al., 1993, с изменениями)

Fig. 1. Rearrangement of rye chromosomes in comparison with wheat chromosomes (from Devos et al., 1993, with modifications)

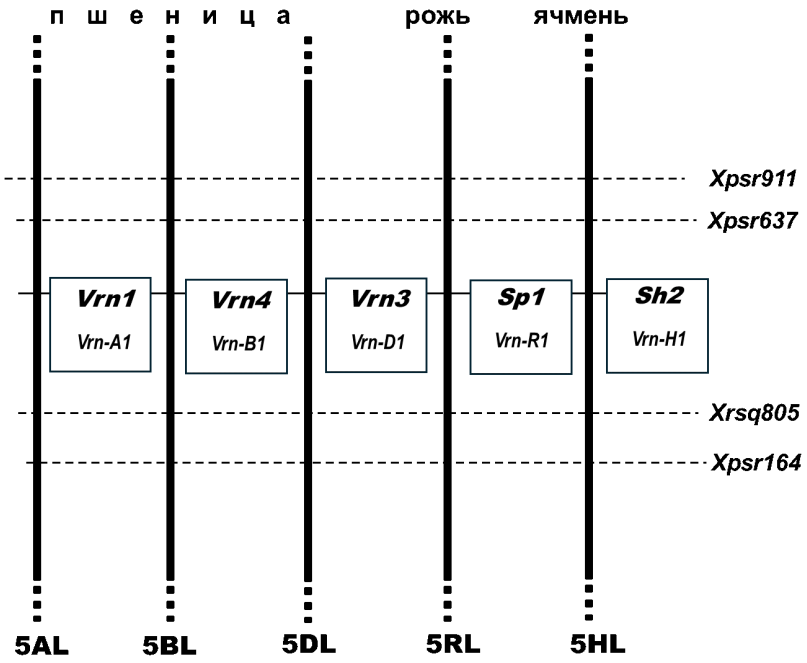


Рис. 2. Схемы хромосомных карт пшеницы, ржи и ячменя с обозначением RFLP-маркеров (справа), хромосом (внизу рисунка) и генов чувствительности к яровизации (вверху в рамках – первичные обозначения, под ними – позже присвоенные синонимы).
Изображено на основе Börner, 2002 (с изменениями)
и http://www.shigen.nig.ac.jp/wheat/komugi/genes/symbolClassList.jsp

Fig. 2. Schemes of wheat, rye and barley chromosome maps with designations of RFLP markers (on the right), chromosomes (in the bottom) and genes for vernalization response (the original names are within the frames in the upper part, the later assigned synonyms are underneath).
The image is based on Börner, 2002 (with alterations),
and http://www.shigen.nig.ac.jp/wheat/komugi/genes/symbolClassList.jsp

клонировании и секвенировании генов), выходят за пределы трибы. Один из таких примеров – гены, контролирующие накопление антоциановых пигментов в перикарпии зерновки (у пшеницы – *Pp3*, *Purple pericarp*, у риса и кукурузы – генов из семейства *R*: *Ra* риса, *R(Lc)* кукурузы). На рисунке 3 приведены хромосомные карты пшеницы, риса и кукурузы с генами, относящимися к одному ряду.

После 2000 г. наступила реализация крупных проектов, как правило, выполнявшихся международными консорциумами, по секвенированию и сборке полных геномов высших растений. Особое внимание уделено секвенированию важнейших сельскохозяйственных культур. Расшифровка полных геномов ускорилась с внедрением методов высокопроизводительного секвенирования (секвенирования нового поколения, NGS – Next-Generation Sequencing) (рис. 4; Glagoleva et al., 2016), дающих возможность быстрого и масштабного определения нуклеотидных последовательностей по сравнению с классическим методом секвенирования по Сэнгеру. Сложный геном аллогексаплоидной пшеницы *T. aestivum* L. был секвенирован позже большинства других культур (IWGSC et al., 2018). Относительно недавно была представлена и полная сборка генома ржи (Rabanus-Wallace et al., 2021).

Сравнение геномов высших растений на основе данных секвенирования нового поколения и дальнейших сборок, во-первых, позволило наглядно проиллюстрировать общее происхождение геномов всех высших растений. Во-вторых, четко обозначились этапы, когда общие предки того или иного крупного таксона проходили полиплоидизацию, а затем снова эволюционировали в диплоидные организмы путем крупных перестроек хромосом с последующей неофункционализацией (появлением новой функции у одного из дуплицированных гомологичных генов), псевдогенизацией (потерей функции гена) и/или полной утратой дуплицированных копий. Среди видов культурных растений, относящихся к семейству Злаковые (Poaceae), кукуруза (триба Maydeae) относится к числу сравнительно недавно возникших палеополиплоидов – неслучайно у нее до сих пор наблюдаются дуплицированные копии тех генов, которые у ее родичей встречаются в единственном числе. Триба Пшеницевые (Triticeae) представлена недавно возникшими аллополиплоидами с удвоенным числом копий генов у тетраплоидов и утроенным у гексаплоидов (Salse et al., 2009; Abrouk et al., 2010; Pont et al., 2011).

Синтения геномов представителей семейства Злаковые наглядно проиллюстрирована при помощи круговой сравнительной диаграммы, представленной в работе S. Sun et al. (2017). Однако, как оказалось, синтения объясняет отнюдь не все случаи параллелизма в наследственной изменчивости. Отчасти исключения возникают именно в связи с наличием в геномах дуплицированных копий – как основного материала для возникновения «новой» изменчивости и дальнейшего отбора. Сперва «пробелы» в гомологических рядах (прерывание гомологических рядов генов в череде относительно близких таксонов) рассматривались как головоломки. Затем расшифровка последовательностей генов показала, что некоторые гены приобрели сходную функцию в результате конвергенции, а не синтении. Эти исключе-

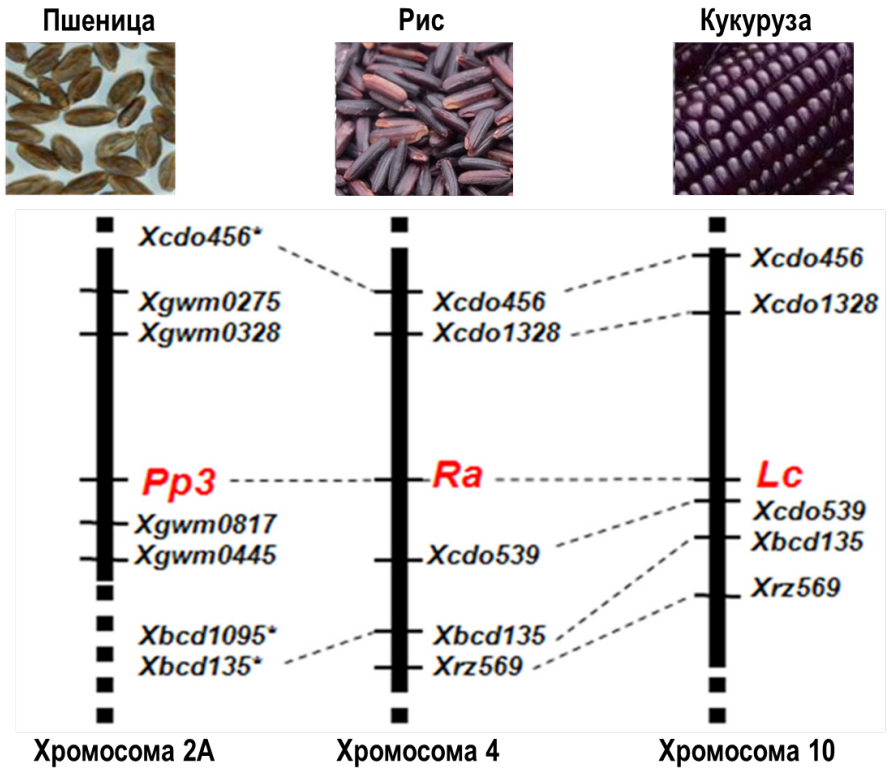


Рис. 3. Схемы хромосомных карт тетраплоидной пшеницы, риса и кукурузы с обозначениями локализации генов, контролирующих синтез антоцианов в перикарпии зерновки и сцепленных с ними маркеров. Одинаковые маркерные локусы соединены пунктирными линиями.
Схемы составлены на основе данных Khlestkina et al., 2010; Hu et al., 1996; Wang, Shu, 2007

Fig. 3. Schemes of tetraploid wheat, rice and maize chromosome maps with designations of genes for anthocyanin synthesis in the pericarp and the linked markers. Identical marker loci are connected with dashed lines.
The schemes are based on the data by Khlestkina et al., 2010; Hu et al., 1996; Wang, Shu, 2007

Рис. 4. Хронология секвенирования и сборки полных геномов некоторых основных сельскохозяйственных растений (по Glagoleva et al., 2016, с дополнениями)

Fig. 4. Chronology of sequencing and whole genome assembly for a number of crops (from Glagoleva et al., 2016, with modifications)

ния из правил наглядно демонстрируются на примере генов «Зеленой революции» – генов низкорослости злаков. С изменением агротехнологий в середине XX века для массового производства потребовались растения с коротким прочным стеблем. Источники генов низкорослости (*Reduced height*) для селекции были найдены среди японских сортов. Ими стали 'Norin 10' (гены *Rht1* и *Rht2*) и 'Akakomugi' (ген *Rht8*). Широкое изучение генов короткостебельности выявило среди них гиббереллин-чувствительные и нечувствительные, что указывало на два ожидаемых гомологических ряда в наследственной изменчивости по этому признаку (Khlestkina et al., 2020). Однако после расшифровки последовательностей генов обнаружено, что таких рядов как минимум три (рис. 5). Сравним ряды генов, которые обеспечивают гиббереллин-зависимую низкорослость. У пшеницы, ячменя, ржи и риса гены, контролирующие синтез одного и того же соединения – гиббереллина, мутации по которым обеспечивают низкорослость, делятся на две группы. У пшеницы и ржи эти гены, обозначенные *Rht12* и *Ddw1*, вызывают повышение экспрессии фермента 2-оксидазы гибберелловой кислоты (ГК), что приводит к низкорослости, поскольку в качестве субстрата этот фермент использует активную форму ГК, расходуя ее (рис. 6). В результате гиббереллина не хватает для обеспечения нормального роста стебля. У риса и ячменя гены, обозначенные *Sd1* и *Denso/Sdw1*, кодируют фермент 20-оксидазу гибберелловой кислоты – фермента, необходимого для синтеза гиббереллина. В присутствии мутантных аллелей *sd1* и *denso/sdw1* гормон не синтезируется (см. рис. 6).

Итак, гены разные, тип мутаций разный (в первом случае gain-of-function, во втором – loss-of-function), а результат на уровне фенотипа одинаков – низкорослые формы. Это типичный пример конвергенции. По-видимому, у пшеницы не закрепился такой же механизм, как у риса и ячменя, из-за наличия дуплицированных копий в геноме гексаплоидного вида. Вероятность встретить мутант пшеницы, у которого бы все копии гена, кодирующего фермент 20-оксидазу гибберелловой кислоты, несли мутации по типу loss-of-function, ничтожна.

Еще один пример признаков, контролируемых ортологичными генами, – черная и коричневая окраска колоса у злаков. В пределах рода *Triticum*, а также у рода *Aegilops* L. (эгилопс) наблюдаются ортологичные гены *Bg* (*Black glume*) и *Rg* (*Red glume*), определяющие черную и красную окраску колоса. В 2010 г. (Khlestkina, 2010) на основе экспериментального анализа (изучения экспрессии структурных генов биосинтеза флавоноидов) было высказано предположение: гены *Bg* и *Rg* регулируют синтез фенольных соединений флобафенов. Позже это было подтверждено для одного из ортологов и показано, что регуляторный ген относится к семейству генов, кодирующих транскрипционные факторы R2R3-MYB (Abrouk et al., 2021).

На рисунке 7 изображены схемы хромосомных карт различных видов пшеницы и ячменя, обозначающих локализацию генов, контролирующих черную окраску колоса (у пшеницы за счет черной окраски колосковых чешуй – *Bg*, *Black glume*; у ячменя за счет черной окраски цветковой чешуи и перикарпия – *Blp*, *Black lemma and pericarp*). Видно, что у четырех видов пшеницы – гексаплоидного *Triticum aestivum*, диплоидного *T. monococcum* L. и тетраплоидных *T. timopheevii* Zhuk. и *T. durum* Desf. – гены *Bg* составляют ортологичный ряд.

Хромосомные карты ячменя *Hordeum vulgare*, относящегося к трибе Пшеницевые, имеют почти полную колинеарность с таковыми пшеницы. Гены ячменя и пшеницы часто составляют общие ряды ортологичных генов. Тем не менее ген *Blp*, определяющий черную окраску колоса ячменя, картирован не в коротком, а в длинном плече хромосомы 1H (см. рис. 7). Локус *Blp* долго оставался нерасшифрованным. На основе сравнительного транскриптомного анализа изогенных линий ячменя, различающихся по аллелям локуса *Blp*, было выдвинуто предположение, что ген *Blp* связан с накоплением и окисле-

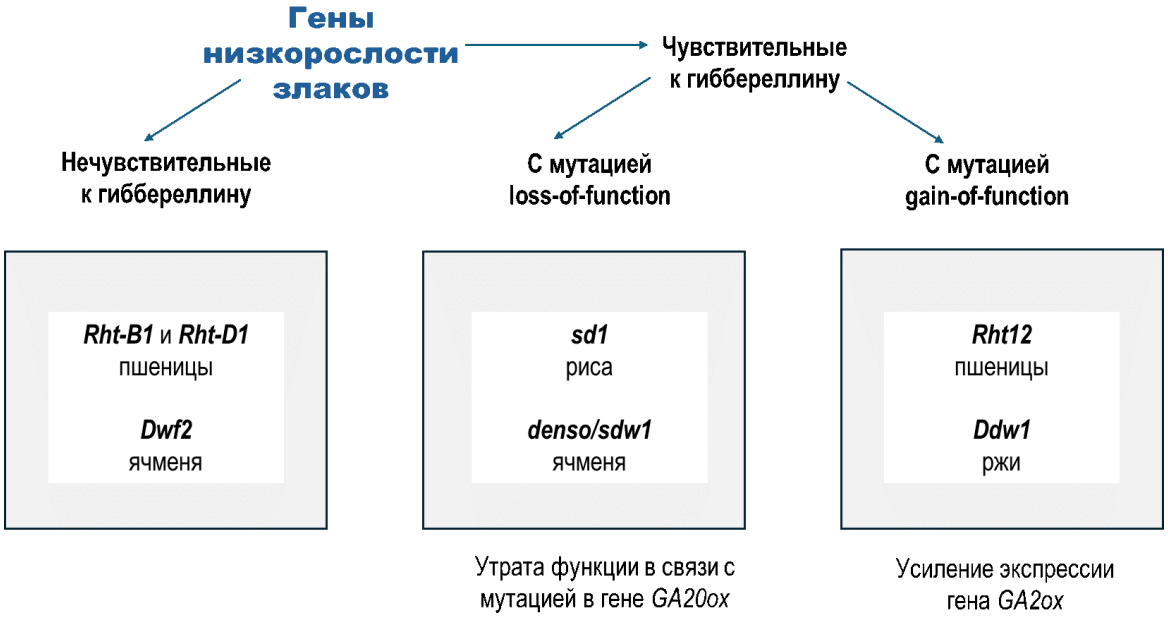


Рис. 5. Группы генов низкорослости у злаков. Схема составлена на основе анализа данных Ashikari et al., 2002; Jia et al., 2009; Ford et al., 2018; Sun L. et al., 2019

Fig. 5. Groups of dwarfing genes in cereals crops. The scheme is based on the data analysis by Ashikari et al., 2002; Jia et al., 2009; Ford et al., 2018; Sun L. et al., 2019

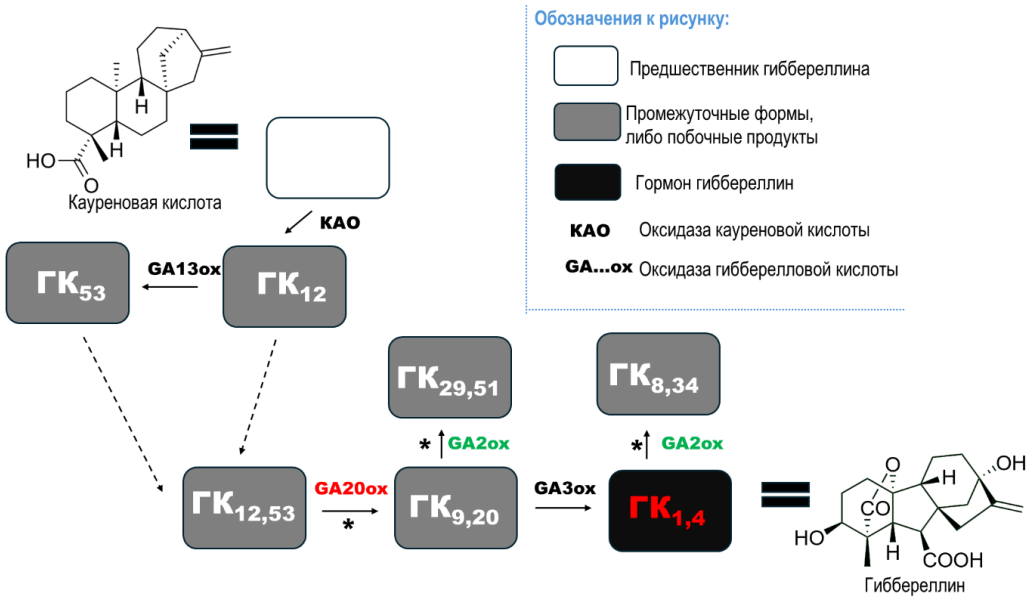


Рис. 6. Схема синтеза гиббереллинов. Основные ферменты и изменения, которые приводят к низкорослости, отмечены звездочкой. Схема составлена на основе анализа данных Ashikari et al., 2002; Jia et al., 2009; Ford et al., 2018; Sun L. et al., 2019

Fig. 6. Scheme of gibberellin biosynthesis. Major enzymes and alterations leading to dwarfism are marked with an asterisk. The scheme is based on the data analysis by Ashikari et al., 2002; Jia et al., 2009; Ford et al., 2018; Sun L. et al., 2019

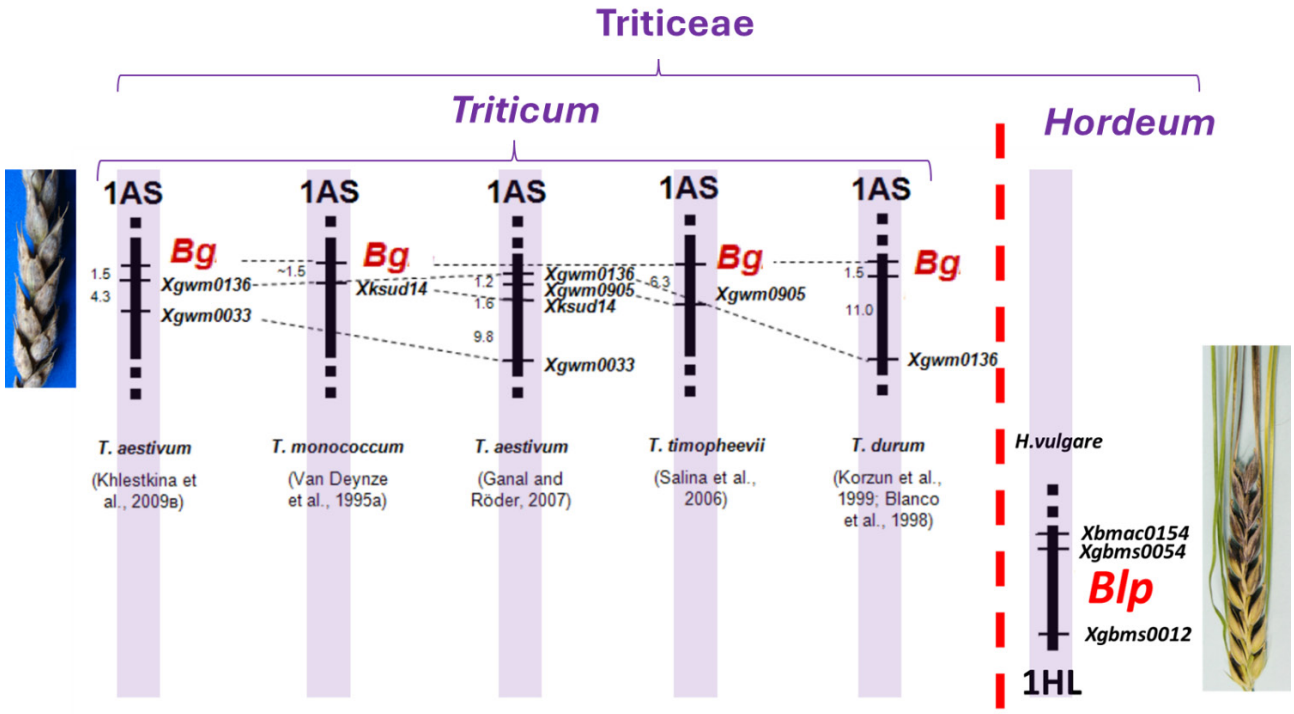


Рис. 7. Схемы хромосомных карт различных видов пшеницы и ячменя с обозначениями локализации генов, контролирующих черную окраску колоса. Одинаковые маркерные локусы соединены пунктирными линиями. 1AS – короткое плечо хромосомы 1A у разных видов пшеницы; 1HL – длинное плечо хромосомы 1H ячменя. Схема составлена на основе анализа данных Khlestkina et al., 2009; Van Deynze et al., 1995; Ganal, Röder, 2007; Salina et al., 2006; Korzun et al., 1999; Blanco et al., 1998; Glagoleva et al., 2017

Fig. 7. Schemes of genetic linkage maps for wheat species and barley with designations of genes for black ear. Identical marker loci are connected with dashed lines. 1AS is the short arm of chromosome 1A in wheat species; 1HL is the long arm of chromosome 1H in barley. The scheme is based on the data analysis by Khlestkina et al., 2009; Van Deynze et al., 1995; Ganal, Röder, 2007; Salina et al., 2006; Korzun et al., 1999; Blanco et al., 1998; Glagoleva et al., 2017

нием фенольных соединений (Glagoleva et al., 2017). Оно согласовывалось с результатами анализа пигментов, который, кроме подтверждения фенольной природы окрашивающих колос веществ, позволил еще и установить, что этот черный пигмент относится к меланинам (Shoeva et al., 2020). Были открыты новые клеточные структуры, названные меланопластами, которые присутствуют только в клетках тканей растений, накапливающих меланины (Shoeva et al., 2020). И, наконец, B. Li et al. (2024) показали, что ген *Blp* ячменя (*HvBlp*) кодирует транспортер тирозина (что согласуется с данными о меланиновой природе изучаемого пигмента) и гомологичен гену *OsBh4* риса, имеющему такую же функцию (черная окраска перикарпия и чешуй). Однако *HvBlp* и *OsBh4* – не ортологи. *HvBlp* произошел из тандемной дупликации, не встречающейся у риса (Li B. et al., 2024). Таким образом, черная окраска колоса пшеницы и ячменя объясняется конвергентным сходством, черная окраска перикарпия и чешуй ячменя и риса – тоже пример конвергентного сходства.

Примеры, когда естественный отбор использует разные гены и разные мутации для «достижения» одного и того же результата у разных видов, встречается широко. Один из ярких примеров – гены, кодирующие антифризные белки. Эти белки служат устойчивости организмов к замерзанию. Многие организмы приобрели это приспособление в ходе эволюции независимо. Белки-антифризы эволюционировали у них из разных исходных генов, но в результате все они имеют сходные свойства и сходный принцип организации: это небольшие белки с плоской поверхностью, богатой аминокислотой треонином. «Треониновые» белки нужны для связывания с поверхностью кристаллов льда (Goodsell, 2009).

Конвергенция является результатом адаптации к неблагоприятным условиям, когда естественный отбор «использует» ранее нейтральные мутации, становившиеся важными для адаптации в изменившейся среде. Изменение условий требует «быстрых решений», которые возможны при наличии выбора готового материала в виде дупликаций генов, случайно накопивших мутации, оказавшиеся полезными в новых условиях (рис. 8).

Сегодня, сталкиваясь с вызовами меняющегося климата и нестабильных погодных условий, важно применить эти подсказки природы и адаптировать данный механизм для селекции. При этом в свете подробно задокументированной на сегодняшний день синтении геномов закон Вавилова широко используется в частной генетике, для создания доноров ценных генов, предоставляемых затем из коллекций (например, из коллекции ВИР) по заявкам селекционеров. Применяется закон и при улучшении генотипов растений при помощи направленного мутагенеза. Именно благодаря явлению синтении множество работ базируются на данных, ранее полученных на удобных модельных объектах, каким для растений является *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. со своим маленьким геномом и коротким жизненным циклом. Быстро полученные на модельном объекте знания применяются для развития исследований на сложных объектах, в частности хозяйственно значимых видах. На основе синтении осуществляется и поиск генов-мишеней для редактирования. Пример практического применения закона Вавилова в наши дни – это растения, отредактиро-

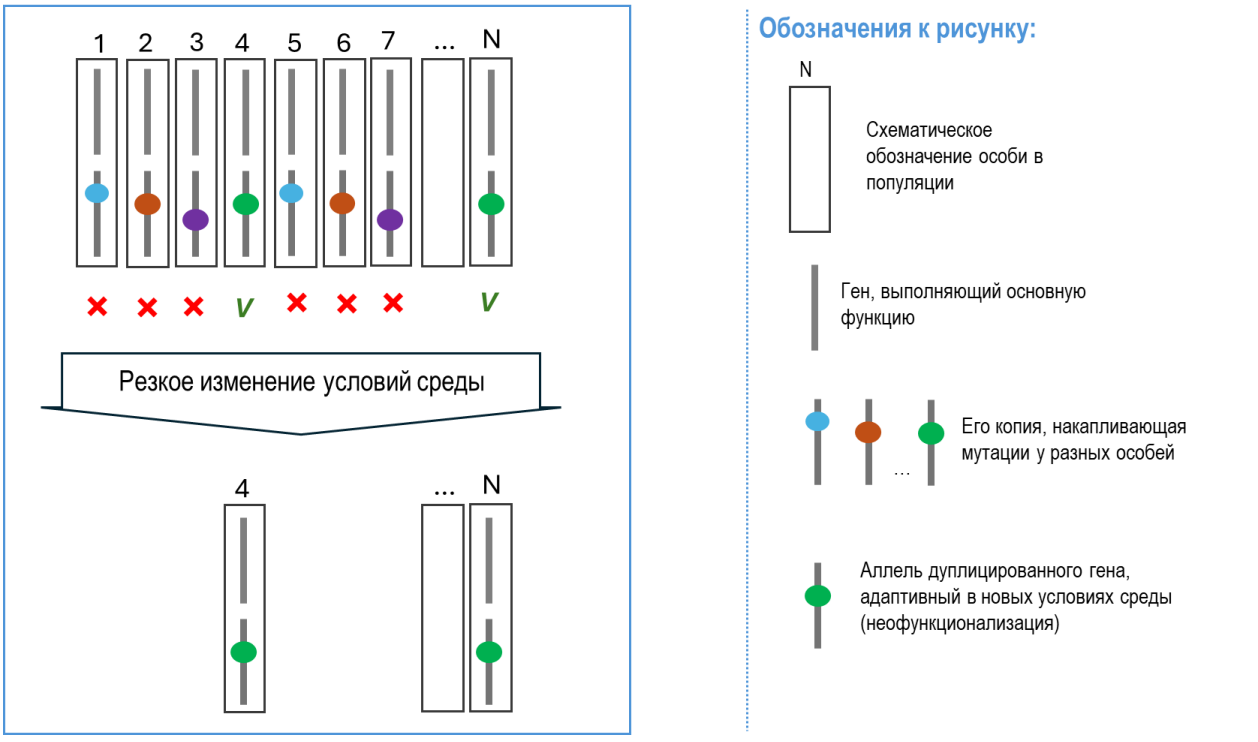


Рис. 8. Схематическое изображение механизма адаптации в меняющихся условиях среды за счет дупликаций генов и накопившихся в них нейтральных мутаций, некоторые из которых становятся адаптивными в новых условиях (гипотетическая адаптивная мутация обозначена зеленым цветом)

Fig. 8. Schematic representation of the mechanism of adaptation to changing environmental conditions due to gene duplications and neutral mutations accumulated in them, some of which become adaptive under new conditions (the hypothetical adaptive mutation is highlighted in green)

ванные по одному и тому же гену (Korotkova et al., 2017, 2019; Kuluev et al., 2022; Ukhatova et al., 2023).

Интересен пример с геном *Mlo* (*Mildew locus O*), нокаут которого обеспечивает устойчивость к мучнистой росе. Мутация *mlo* у диплоидных видов, например у ячменя, была описана довольно давно (Jørgensen, 1992). После получения мутанта ячменя по данному гену путем индуцированного мутагенеза пытались таким же способом получить и мутант пшеницы мягкой. Позже стало ясно, почему попытки получить мутант пшеницы были неудачными. У аллогексаплоидной пшеницы три копии гена *Mlo*. Вероятность получить одновременно в одном и том же растении мутации сразу в трех копиях гена *Mlo* была ничтожна. Тем не менее при помощи направленного мутагенеза с использованием геномного редактирования удалось нокаутировать все копии этого гена у пшеницы мягкой и получить генотип с повышенной устойчивостью к мучнистой росе (Wang et al., 2014). Впоследствии *mlo*-мутанты были получены при помощи редактирования у томата (Nekrasov et al., 2017), винограда (Malnoy et al., 2016) и других видов.

Еще один пример – целенаправленная замена определенных аминокислотных остатков в продукте гена *ALS* (кодирует фермент ацетолактатсинтазу) риса (Sun Y. et al., 2016), сои (Li Z. et al., 2015), кукурузы (Svitashev et al., 2015), картофеля (Butler et al., 2016) повышала устойчивость к гербициду хлорсульфурону. Это тоже ряд мутаций, искусственно созданных параллельно у нескольких видов.

Поиск новых мишеней для низкорослости злаков также привел к созданию мутаций по гену *DEP1* (*DENSE and ERECT PANICLE*) параллельно у пшеницы и риса при помощи технологии CRISPR/Cas9 (Li M. et al., 2016; Zhang et al., 2016; Zheng et al., 2016).

Таким образом, сегодня очевидный и уже применяемый путь практической реализации вавиловского закона – это работа с генами-ортологами для создания путем генетического редактирования нужных полезных мутаций, которые мы наблюдаем у одного вида и можем спланировать и получить подобные мутации у других видов. Тем не менее набор таких потенциальных генов-мишеней все еще ограничен (Ukhatova et al., 2023). По крайней мере, он недостаточен для кардинальных изменений свойств, связанных с адаптацией к резко меняющимся условиям среды. В изменившихся условиях адаптации нередко содействуют гены, нейтральные мутации в которых накапливались в течение оптимального периода. Их источник – дупликации.

Особенно ценен указанный выше механизм для организмов, ведущих прикрепленный образ жизни, – для растений. Именно их геномы изобилуют дупликациями генов благодаря полиплоидизации. Возможно ли при помощи направленного мутагенеза создать на основе многочисленных функционально неактивных дуплицированных генов в геномах культурных растений разнообразие мутантных форм для дальнейшего тестирования в различных стрессовых условиях? Или даже целенаправленно перепрограммировать дуплицированные копии при помощи редактирования под будущие условия окружающей среды? Последнее, однако, требует предварительного анализа больших данных, накопленных по генным и метаболическим сетям, а также фенотипических данных в различных условиях среды (например, данных, накопленных при многолетнем изучении коллекции ВИР в различных эколого-географических условиях). Инструменты редактирования позволяют сегодня вносить мутации, не затрагивая гены, имеющие почти полную идентичность. Дело за развитием комплексного анализа больших данных, включая «исторические» данные. Генетические технологии позволяют расшифровывать гены сельскохозяйственных растений, используемых в периоды, когда климат менялся в сторону резкого потепления (Semilet et al., 2023, 2024).

Полагаем, что в будущем, с возрастанием вызовов, которые приносят климатические изменения, совместные усилия селекционеров, генетиков, биоинформатиков, генных инженеров, специалистов по генетическим ресурсам растений смогут обеспечить реализацию принципиально новой стратегии к улучшению возделываемых растений посредством моделирования естественных процессов адаптации и целенаправленного использования дупликаций генов.

References / Литература

Abrouk M., Athiyannan N., Müller T., Pailles Y., Stritt C., Roulin A.C. et al. Population genomics and haplotype analysis in spelt and bread wheat identifies a gene regulating glume color. *Communications Biology*. 2021;4(1):375. DOI: 10.1038/s42003-021-01908-6

Abrouk M., Murat F., Pont C., Messing J., Jackson S., Faraut T. et al. Palaeogenomics of plants: Synteny-based modelling of extinct ancestors. *Trends in Plant Science*. 2010;15(9):479-487. DOI: 10.1016/j.tplants.2010.06.001

Ahn S., Tanksley S.D. Comparative linkage maps of the rice and maize genomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 1993;90(17):7980-7984. DOI: 10.1073/pnas.90.17.7980

Ashikari M., Sasaki A., Ueguchi-Tanaka M., Itoh H., Nishimura A., Datta S. et al. Loss-of-function of a rice gibberellin biosynthetic gene, *GA20 oxidase* (*GA20ox-2*), led to the rice 'green revolution'. *Breeding Science*. 2002;52(2):143-150. DOI: 10.1270/jsbbs.52.143

Blanco A., Bellomo M.P., Cenci A., De Giovanni C., D'Ovidio R., Iacono E. et al. A genetic linkage map of durum wheat. *Theoretical and Applied Genetics*. 1998;97(5):721-728. DOI: 10.1007/s001220050948

Börner A. Gene and genome mapping in cereals. *Cellular and Molecular Biology Letters*. 2002;7(2A):423-429.

Butler N.M., Baltes N.J., Voytas D.F., Douches D.S. Geminivirus-mediated genome editing in potato (*Solanum tuberosum* L.) using sequence-specific nucleases. *Frontiers in Plant Science*. 2016;7:1045. DOI: 10.3389/fpls.2016.01045

Devos K.M., Atkinson M.D., Chinoy C.N., Francis H.A., Harcourt R.L., Koebner R.M. et al. Chromosomal rearrangements in the rye genome relative to that of wheat. *Theoretical and Applied Genetics*. 1993;85(6-7):673-680. DOI: 10.1007/BF00225004

Ford B.A., Foo E., Sharwood R., Karafiatova M., Vrána J., MacMillan C. et al. *Rht18* semidwarfism in wheat is due to increased *GA2-oxidaseA9* expression and reduced GA content. *Plant Physiology*. 2018;177(1):168-180. DOI: 10.1104/pp.18.00023

Ganal M., Röder M.S. Microsatellite and SNP markers in wheat breeding. In: R.K. Varshney, R. Tuberosa (eds). *Genomics-Assisted Crop Improvement. Vol. 2. Genomics Applications in Crops*. Dordrecht: Springer; 2007. p.1-24. DOI: 10.1007/978-1-4020-6297-1_1

Glagoleva A.Y., Shmakov N.A., Shoeva O.Y., Vasiliev G.V., Shatskaya N.V., Börner A. et al. Metabolic pathways and genes identified by RNA-seq analysis of barley near-isogenic lines differing by allelic state of the *Black lemma and*

pericarp (*Blp*) gene. *BMC Plant Biology*. 2017;17 Suppl 1:182. DOI: 10.1186/s12870-017-1124-1

Glagoleva A.Y., Shoeva O.Y., Khlestkina E.K. Structural and functional divergence of homoeologous genes in allopolyploid plant genomes. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2016;20(6):823-831. [in Russian] (Глаголева А.Ю., Шоева О.Ю., Хлесткина Е.К. Структурно-функциональная дивергенция гомеологичных генов в аллополиплоидном геноме растений. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2016;20(6):823-831). DOI: 10.18699/VJ16.204

Goodsell D. Molecule of the month: Antifreeze proteins. RCSB PDB Protein Data Bank; 2009. DOI: 10.2210/rcsb_pdb/mom_2009_12

Gostimsky S.A., Kokaeva Z.G., Konovalov F.A. Studying plant genome variation using molecular markers. *Russian Journal of Genetics*. 2005;41(4):378-388. [in Russian] (Гостимский С.А., Кокаева З.Г., Коновалов Ф.А. Изучение организации и изменчивости генома растений с помощью молекулярных маркеров. *Генетика*. 2005;41(4):480-492). DOI: 10.1007/s11177-005-0101-1

Hu J., Anderson B., Wessler S.R. Isolation and characterization of rice *R* genes: Evidence for distinct evolutionary paths in rice and maize. *Genetics*. 1996;142(3):1021-1031. DOI: 10.1093/genetics/142.3.1021

IWGSC; Appels R., Eversole K., Stein N., Feuillet C., Keller B. et al. Shifting the limits in wheat research and breeding using a fully annotated reference genome. *Science*. 2018;361(6403):7181. DOI: 10.1126/science.aar7191

Jia Q., Zhang J., Westcott S., Zhang X.Q., Bellgard M., Lance R. et al. GA-20 oxidase as a candidate for the semidwarf gene *sdw1/denso* in barley. *Functional and Integrative Genomics*. 2009;9(2):255-262. DOI: 10.1007/s10142-009-0120-4

Jørgensen J.H. Discovery, characterization and exploitation of *Mlo* powdery mildew resistance in barley. *Euphytica*. 1992;63(1-2):141-152. DOI: 10.1007/BF00023919

Khlestkina E.K. Regulatory-target gene relationships in allopolyploid and hybrid genomes. In: K.V. Urbano (ed.). *Advances in Genetics Research. Vol. 3*. Hauppauge, NY: NOVA Science Publishers, Inc.; 2010. p.311-328.

Khlestkina E.K., Röder M.S., Börner A. Mapping genes controlling anthocyanin pigmentation on the glume and pericarp in tetraploid wheat (*Triticum durum* L.). *Euphytica*. 2010;171(1):65-69. DOI: 10.1007/s10681-009-9994-4

Khlestkina E.K., Salina E.A., Pshenichnikova T.A., Röder M.S., Börner A. Glume coloration in wheat: Allelism test, consensus mapping and its association with specific microsatellite allele. *Cereal Research Communications*. 2009;37(1):37-43. DOI: 10.1556/CRC.37.2009.1.5

Khlestkina E.K., Shvachko N.A., Zavarzin A.A., Börner A. Vavilov's series of "green revolution" genes. *Russian Journal of Genetics*. 2020;56(11):1371-1380. DOI: 10.1134/S1022795420110046

Koller O.L., Zeller F.J. The homoeologous relationships of rye chromosomes 4R and 7R with wheat chromosomes. *Genetics Research*. 1976;28(2):177-188. DOI: 10.1017/S0016672300016852

Korotkova A.M., Gerasimova S.V., Khlestkina E.K. Current achievements in modifying crop genes using CRISPR/Cas system. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2019;23(1):29-37. DOI: 10.18699/VJ19.458

Korotkova A.M., Gerasimova S.V., Shumny V.K., Khlestkina E.K. Crop genes modified using CRISPR/CAS system. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2017;21(2):250-258. [in Russian] (Короткова А.М., Герасимова С.В., Шумный В.К., Хлесткина Е.К. Гены сельскохозяйственных растений, модифицированные с помощью системы CRISPR/Cas. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2017;21(2):250-258). DOI: 10.18699/VJ17.244

Korzun V., Roder M.S., Wendehake K., Pasqualone A., Lotti C., Ganal M.W. et al. Integration of dinucleotide microsatellites from hexaploid bread wheat into a genetic linkage map of durum wheat. *Theoretical and Applied Genetics*. 1999;98:1202-1207. DOI: 10.1007/s001220051185

Kuluev B.R., Mikhailova E.V., Kuluev A.R., Galimova A.A., Zaikina E.A., Khlestkina E.K. Genome editing in species of the tribe Triticeae with the CRISPR/Cas system. *Molecular Biology*. 2022;56(6):949-968. [in Russian] (Кулуев Б.Р., Михайлова Е.В., Кулуев А.Р., Галимова А.А., Заикина Е.А., Хлесткина Е.К. Редактирование геномов представителей трибы Пшеницевые с использованием системы CRISPR/CAS. *Молекулярная биология*. 2022;56(6):949-968). DOI: 10.31857/S0026898422060155

Levitsky G.A. The progress of genetical cytology and its application to cultivated plants. In: *The Recent Attainments and Prospects in the Domain of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. Leningrad; 1929. p.87-98. [in Russian] (Левитский Г.А. Успехи генетической цитологии и ее применение к культурным растениям. В кн.: *Достижения и перспективы в области прикладной ботаники, генетики и селекции*. Ленинград, 1929. С.87-98).

Levitsky G.A., Kuzmina N.E. Karyological investigations on the systematics and phylogenetics of the genus *Festuca*. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 1927;17(3):3-36. [in Russian] (Левитский Г.А., Кузьмина Н.Е. Кариологический метод в систематике и филогенетике рода *Festuca* (подр. *Eu-Festuca*). *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1927;17(3):3-36).

Lewitsky G.A. Review of investigations performed at the Cytological Laboratory of the Institute of Plant-Industry in USSR (former Inst. of Applied Botany & New Cultures), 1927–1930. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 1931;27(1):9-17. [in Russian] (Левитский Г.А. Обзор работ цитологической лаборатории Всесоюзного института растениеводства (бывш. Институт прикладной ботаники и новых культур), 1927–1930. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1931;27(1):9-17).

Lewitzky G.A. The karyotypes of some pairs of related forms of plants. *Botanicheskii zhurnal = Botanical Journal*. 1940;25(4-5):292-296. [in Russian] (Левитский Г.А. Кариотипы некоторых пар родственных форм растений. *Ботанический журнал*. 1940;25(4-5):292-296).

Li B., Jia Y., Xu L., Zhang S., Long Z., Wang R. et al. Transcriptional convergence after repeated duplication of an amino acid transporter gene leads to the independent emergence of the black husk/pericarp trait in barley and rice. *Plant Biotechnology Journal*. 2024;22(5):1282-1298. DOI: 10.1111/pbi.14264

Li M., Li X., Zhou Z., Wu P., Fang M., Pan X. et al. Reassessment of the four yield-related genes *Gn1a*, *DEP1*, *GS3*, and *IPA1* in rice using a CRISPR/Cas9 system. *Frontiers in Plant Science*. 2016;7:377. DOI: 10.3389/fpls.2016.0037

Li Z., Liu Z.B., Xing A., Moon B.P., Koellhoffer J.P., Huang L. et al. Cas9-guide RNA directed genome editing in soybean. *Plant Physiology*. 2015;169(2):960-970. DOI: 10.1104/pp.15.00783

Malnoy M., Viola R., Jung M.H., Koo O.J., Kim S., Kim J.S. et al. DNA-Free genetically edited grapevine and apple protoplast using CRISPR/Cas9 ribonucleoproteins. *Frontiers in Plant Science*. 2016;7:1904. DOI: 10.3389/fpls.2016.01904

McIntosh R.A., Yamazaki Y., Dubcovsky J., Rogers J., Morris C., Appels R., Xia X.C. Catalogue of gene symbols for wheat: [website]. Available from: http://www.shigen.nig.ac.jp/wheat/komugi/genes/symbolClassList.jsp [accessed Jun. 06, 2025].

Naranjo T., Fernández-Rueda P. Homoeology of rye chromosome arms to wheat. *Theoretical and Applied Genetics*. 1991;82(5):577-586. DOI: 10.1007/BF00226793

Naranjo T., Roca A., Goicoechea P.G., Giraldez R. Arm homoeology of wheat and rye chromosomes. *Genome*. 1987;29(6):873-882. DOI: 10.1139/g87-149

Nekrasov V., Wang C., Win J., Lanz C., Weigel D., Kamoun S. Rapid generation of a transgene-free powdery mildew resistant tomato by genome deletion. *Scientific Reports*. 2017;7(1):482. DOI: 10.1038/s41598-017-00578-x

Paterson A.H., Wing R.A. Genome mapping in plants. *Current Opinion in Biotechnology*. 1993;4(2):142-147. DOI: 10.1016/0958-1669(93)90114-C

Pont C., Murat F., Confolent C., Balzergue S., Salse J. RNA-seq in grain unveils fate of neo- and paleopolyploidization events in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Genome Biology*. 2011;12(12):R119. DOI: 10.1186/gb-2011-12-12-r119

Rabanus-Wallace M.T., Hackauf B., Mascher M., Lux T., Wicker T., Gundlach H. et al. Chromosome-scale genome assembly provides insights into rye biology, evolution and agronomic potential. *Nature Genetics*. 2021;53(4):564-573. DOI: 10.1038/s41588-021-00807-0

Salina E.A., Leonova I.N., Efremova T.T., Röder M.S. Wheat genome structure: translocations during the course of polyploidization. *Functional and Integrative Genomics*. 2006;6(1):71-80. DOI: 10.1007/s10142-005-0001-4

Salse J., Abrouk M., Bolot S., Guilhot N., Courcelle E., Faraut T. et al. Reconstruction of monocotelydoneous proto-chromosomes reveals faster evolution in plants than in animals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2009;106(35):14908-14913. DOI: 10.1073/pnas.0902350106

Semilet T., Shvachko N., Smirnova N., Shipilina L., Khlestkina E. Using DNA markers to reconstruct the lifetime morphology of barley grains from carbonized cereal crop remains unearthed at Usvyaty Settlement. *Biological Communications*. 2023;68(1):3-9. DOI: 10.21638/spbu03.2023.101

Semilet T.V., Smirnova N.V., Shvachko N.A., Kovaleva O.N., Khlestkina E.K. Restoration of the spike architectonics in ancient barley excavated at the twelfth-century settlement of Usvyaty. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(3):199-209. [in Russian] (Семилет Т.В., Смирнова Н.В., Швачко Н.А., Ковалева О.Н., Хлесткина Е.К. Восстановление архитектоники колоса древнего ячменя из раскопа Усвятского городища XII века. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(3):199-209). DOI: 10.30901/2227-8834-2024-3-199-209

Shibaike H. Molecular genetic mapping and plant evolutionary biology. *Journal of Plant Research*. 1998;111:383-388. DOI: 10.1007/BF02507802

Shoeva O.Yu., Mursalimov S.R., Gracheva N.V., Glagoleva A.Y., Börner A., Khlestkina E.K. Melanin formation in barley grain occurs within plastids of pericarp and husk cells. *Scientific Reports*. 2020;10(1):179. DOI: 10.1038/s41598-019-56982-y

Sun L., Yang W., Li Y., Shan Q., Ye X., Wang D. et al. A wheat dominant dwarfing line with *Rht12*, which reduces stem cell length and affects gibberellic acid synthesis, is a 5AL terminal deletion line. *The Plant Journal*. 2019;97(5):887-900. DOI: 10.1111/tpj.14168

Sun S., Wang J., Yu J., Meng F., Xia R., Wang L. et al. Alignment of common wheat and other grass genomes establishes a comparative genomics research platform. *Frontiers in Plant Science*. 2017;8:1480. DOI: 10.3389/fpls.2017.01480

Sun Y., Zhang X., Wu C., He Y., Ma Y., Hou H. et al. Engineering herbicide-resistant rice plants through CRISPR/Cas9-mediated homologous recombination of acetolactate synthase. *Molecular Plant*. 2016;9(4):628-631. DOI: 10.1016/j.molp.2016.01.001

Svitashev S., Young J.K., Schwartz C., Gao H., Falco S.C., Cigan A.M. Targeted mutagenesis, precise gene editing, and site-specific gene insertion in maize using Cas9 and guide RNA. *Plant Physiology*. 2015;169(2):931-945. DOI: 10.1104/pp.15.00793

Ukhatova Y.V., Erastenkova M.V., Korshikova E.S., Krylova E.A., Mikhailova A.S., Semilet T.V. et al. Improvement of crops using the CRISPR/Cas system: new target genes. *Molecular Biology*. 2023;57(3):387-410. [in Russian] (Ухатова Ю.В., Ерастенкова М.В., Коршикова Е.С., Крылова Е.А., Михайлова А.С., Семилет Т.В. и др. Улучшение культурных растений при помощи системы CRISPR/Cas: новые гены-мишени. *Молекулярная биология*. 2023;57(3):387-410). DOI: 10.31857/S0026898423030151

Van Deynze A.E., Nelson J.C., Sorrells M.E., McCouch S.R., Dubovsky J., Dvorák J. et al. Molecular-genetic maps for group 1 chromosomes of Triticeae species and their relation to chromosomes in rice and oat. *Genome*. 1995;38(1):45-59. DOI: 10.1139/g95-006

Vavilov N.I. The law of homological series in hereditary variation (Zakon gomologicheskikh ryadov v nasledstvennoy izmenchivosti). In: *Proceedings of the III All-Russian Congress on Breeding and Seed Production in Saratov on June 4–13, 1920. Issue 1 (Trudy III Vserossiyskogo syezda po selektsii i semenovodstvu v g. Saratov 4–13 iyunya 1920 g. Vyp. 1)*. Saratov; 1920. p.41-56. [in Russian] (Вавилов Н.И. Закон гомологических рядов в наследственной изменчивости. В кн.: *Труды III Всероссийского съезда по селекции и семеноводству в г. Саратов 4–13 июня 1920 г. Вып. 1*. Саратов; 1920. С.41-56).

Vavilov N.I. The law of homological series in variation. *Journal of Genetics*. 1922;12(1):47-89. DOI: 10.1007/BF02983073

Wang C., Shu Q. Fine mapping and candidate gene analysis of purple pericarp gene *Pb* in rice (*Oryza sativa* L.). *Chinese Science Bulletin*. 2007;52:3097-3104. DOI: 10.1007/s11434-007-0472-x

Wang Y., Cheng X., Shan Q., Zhang Y., Liu J., Gao C. et al. Simultaneous editing of three homoeoalleles in hexaploid bread wheat confers heritable resistance to powdery mildew. *Nature. Biotechnology*. 2014;32(9):947-951. DOI: 10.1038/nbt.2969

Zhang Y., Liang Z., Zong Y., Wang Y., Liu J., Chen K. et al. Efficient and transgene-free genome editing in wheat through transient expression of CRISPR/Cas9 DNA or RNA. *Nature Communications*. 2016;7:12617. DOI: 10.1038/ncomms12617

Zheng X., Yang S., Zhang D., Zhong Z., Tang X., Deng K. et al. Effective screen of CRISPR/Cas9-induced mutants in rice by single-strand conformation polymorphism. *Plant Cell Reports*. 2016;35(7):1545-1554. DOI: 10.1007/s00299-016-1967-1

Информация об авторе

Елена Константиновна Хлесткина, доктор биологических наук, профессор РАН, член-корреспондент РАН, директор, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, director@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-8470-8254

Information about the author

Elena K. Khlestkina, Dr. Sci. (Biology), Professor of the RAS, Corr. Member of the RAS, Director, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, director@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-8470-8254

Статья поступила в редакцию 23.08.2025; одобрена после рецензирования 01.09.2025; принята к публикации 08.09.2025.
The article was submitted on 23.08.2025; approved after reviewing on 01.09.2025; accepted for publication on 08.09.2025.

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ СЕЛЕКЦИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Научная статья
УДК 636.086.15; 631.527
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-199-208

CC BY

Использование доноров раннеспелости в селекции кукурузы в условиях степной зоны Северо-Кавказского федерального округа России

Т. В. Волощенко[1], А. Д. Уткин[2], Э. Б. Хатефов[2]

[1] *Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, Воронеж, Россия*

[2] *Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия*

Автор, ответственный за переписку: Тимофей Витальевич Волощенко, thedrof3cool@mail.ru

Актуальность. В условиях короткого вегетационного периода и дефицита суммы активных температур в регионах РФ до 55° северной широты возделывание гибридов кукурузы с группой спелости по классификации ФАО 100–300 становится важным направлением в обеспечении кормовой базы животноводства. Сортимент и разнообразие гибридов кукурузы ультраранней и ранней групп спелости очень узок из-за отсутствия достаточного разнообразия в исходном селекционном материале раннеспелых линий. Создание исходного селекционного материала для гибридной селекции кукурузы, адаптированной к агроклиматическим условиям до 55° северной широты РФ, актуально.
Материалы и методы. Исследования проведены в условиях степной зоны (Кабардино-Балкария, г. Прохладный) в 2021–2024 гг. В работе использованы 250 образцов популяции S_1BC_1, полученной на основе гибридизации десяти линий – закрепителей ЦМС кукурузы селекции ООО ССЦ «ОТБОР» с ультраранним спелым сортом кукурузы ‘Белоярое Пшено’ (к-5240) из коллекции ВИР. Методы включали инцухт, тест-кроссы с ЦМС-линиями (М- и С-типы), фенологический и морфометрический анализы, тестирование проростков на холодостойкость в лабораторных условиях.
Результаты. В результате проведенных насыщающих скрещиваний и инбридинга удалось выделить из расщепляющейся популяции S_1BC_1 7 ультраранних, 57 ранних и 3 среднеранние линии, из которых 5 показали устойчивость проростков к воздействию пониженных температур. Фенологические наблюдения показали, что у рекомбинантных линий смещение сроков цветения в сторону раннеспелости находятся в диапазоне от 4 до 16 дней, что позволило улучшить инбредируемый материал от среднепоздней до ультраранней и ранней групп спелости по классификации ФАО.
Заключение. Результаты подтверждают возможность создания исходного раннеспелого селекционного материала для селекции ранней и ультраранней гибридной кукурузы с использованием S_1BC_1 ультрараннеспелого скороспелого сорта кукурузы ‘Белоярое Пшено’ в качестве донора признака раннеспелости.

Ключевые слова: кукуруза, беккроссы, адаптация, раннеспелость, продуктивность, устойчивость к морозу

Благодарности: исследования выполнены в рамках исполнения госзадания по теме № FGEM-2022-0009 «Структурирование и раскрытие потенциала наследственной изменчивости мировой коллекции зерновых и крупяных культур ВИР для развития оптимизированного генбанка и рационального использования в селекции и растениеводстве».
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Волощенко Т.В., Уткин А.Д., Хатефов Э.Б. Использование доноров раннеспелости в селекции кукурузы в условиях степной зоны Северо-Кавказского федерального округа России. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(3):199-208. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-199-208

© Волощенко Т.В., Уткин А.Д., Хатефов Э.Б., 2025

DOMESTIC PLANT BREEDING AT THE PRESENT STAGE

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-199-208

Using donors of earliness in maize breeding in the steppe zone of the North Caucasus Federal District of Russia

Timofey V. Voloshchenko[1], Anton D. Utkin[2], Eduard B. Khatefov[2]

[1] *Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia*
[2] *N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia*

Corresponding author: Timofey V. Voloshchenko, thedrof3cool@mail.ru

Background. Cultivation of maize hybrids belonging to the FAO 100–300 maturity groups up to the 55th parallel north becomes an important area in providing feed for livestock. The range of maize hybrids of the ultra-early and early maturity groups is very narrow due to the lack of sufficient diversity in the initial breeding material. Development of new sources for breeding hybrid maize cultivars adapted to the agroclimatic conditions of 50–55°N is relevant.
Materials and methods. The studies were conducted in the steppe zone of the North Caucasus Federal District (Prokhladny, Kabardino-Balkaria) in 2021–2024. The work involved 250 samples of the S_1BC_1 population obtained by hybridizing ten maize lines – CMS maintainers developed by OTBOR Ltd. – with the ultra-early maize cultivar 'Beloyaroye Psheno' (k-5240) from the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR). The methods included inbreeding, test crosses with CMS lines (M and C types), phenological and morphometric analyses, and testing of seedlings for cold resistance under laboratory conditions.
Results. As a result of saturating crosses and inbreeding, it was possible to isolate 7 ultra-early, 57 early and 3 mid-early lines from the splitting S_1BC_1 population, 5 of which showed seedling resistance to low temperatures. Phenological observations showed that the recombinant lines shifted the flowering dates towards early maturity in the range from 4 to 16 days, which made it possible to shift the maturity groups of the inbred material from mid-late to ultra-early and early according to the FAO classification.
Conclusion. The results confirm the possibility of creating early-maturing source material for breeding early and ultra-early hybrid maize using S_1BC_1 of the ultra-early maize cv. 'Beloyaroye Psheno' as a donor of earliness.

***Keywords*:** maize, backcrosses, adaptation, earliness, productivity, resistance to frosts

Acknowledgements: the research was carried out within the framework of the state task, Project No. FGEM-2022-0009 "Structuring and disclosing the potential of hereditary variation in the global collection of cereal and groat crops at VIR for the development of an optimized genebank and its sustainable utilization in plant breeding and crop production".
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Voloshchenko T.V., Utkin A.D., Khatefov E.B. Using donors of earliness in maize breeding in the steppe zone of the North Caucasus Federal District of Russia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(3):199-208. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-199-208

Введение

Более короткий вегетационный период, наблюдаемый при продвижении посевов кукурузы на север, требует использования более раннеспелых гибридов по сравнению с гибридами, используемыми в центральном и южной зонах РФ. Вследствие более короткого вегетационного периода и дефицита суммы активных температур в северных регионах по сравнению с южными зонами урожайность раннеспелых гибридов существенно ниже урожайности среднеспелых (ФАО 301-400), среднепоздних (ФАО 401–500) и позднеспелых (ФАО 501–600) групп спелости кукурузы по классификации ФАО (Ugenheimer, 1979). Преимуществом раннеспелых гибридов, возделываемых в северных регионах, является способность формировать полноценное, спелое зерно с быстрой влагоотдачей при созревании в сравнении с остальными, более позднеспелыми группами спелости (Panfilov et al., 2021). С экономической точки зрения эти преимущества позволяют получать зерно кукурузы хоть и с меньшей урожайностью, но в непосредственной близости к месту ее использования. Такой подход позволяет избежать дополнительных затрат на перевозку и сушку зерна, обеспечивает более раннюю уборку и освобождение площадей под озимые культуры (Khoroshilov et al., 2006; Kravtsov, Shimansky, 2020). Кроме того, возделывание раннеспелой кукурузы в зонах до 50–55° северной широты снижает риск повреждения зерна от заражения микотоксинами, что чаще встречается у гибридов более поздних групп спелости за счет удлинения вегетационного периода, а также потери урожая вследствие засухи в середине и конце лета. Кукуруза является одной из наиболее ценных злаковых культур во всем мире, и для удовлетворения растущих запросов населения Земли возрастает потребность расширения зоны возделывания кукурузы в умеренных и даже северных широтах.

Современные сорта кукурузы берут начало от южноамериканских предковых злаков, формирующих урожай при температуре 25–30°C, не приспособленных к низким положительным температурам, и замедляют рост и развитие уже при 8–10°C, однако некоторые гибриды и линии способны акклиматизироваться к температуре роста и развития в диапазоне 14–20°C, повышая холодостойкость (Khoroshilov et al., 2006). Кукуруза является одной из наиболее ценных злаковых культур во всем мире, и для удовлетворения растущих запросов населения земли возрастает потребность расширения зоны кукурузосеяния в умеренных и даже северных широтах. В этой связи возникает запрос на получение новых, более холодостойких форм, что возможно лишь при детальном понимании клеточных механизмов устойчивости к низким температурам как непосредственно *Zea mays* L., так и его близкородственных видов (сорго, рис, пшеница).

Генетическое разнообразие мировых ресурсов кукурузы, используемых в гибридной селекции, очень узкое и сводится к линиям, полученным из 5–6 сортов мировой селекции (Iowa Dent, Lancaster, Stiff Stalk Synthetic, Lacon и др.) (Shcherbak et al., 1983), а у раннеспелых форм еще уже из-за использования малого числа доноров признака раннеспелости. Поэтому поиск новых источников генетической плазмы, не родственных традиционным линиям мировой селекции, актуален для избегания возможных эпифитотий, имевших место в мировой практике, связанных с поражением южным гельминтоспориозом кукурузы (*Helminthosporium maydis* Y. Nisik. & C. Miyake.) на Т-типе ЦМС в середине 70-х годов прошлого века (Agrios, 2004). Актуальность этой проблемы возрастает с учетом динамики глобального потепления климата, что существенно усиливает потребность в раннеспелых сортах и гибридах кукурузы при продвижении посевов севернее 50-й параллели северной широты, обеспечения локальными кормовыми ресурсами отрасли животноводства и птицеводства в этих регионах.

Целю исследования было улучшение родительских форм кукурузы с использованием донора ультраранеспелости ‘Белоярое Пшено’ для гибридной селекции.

Материалы и методы

Опыты проводили в период с 2021 по 2024 г. в агроклиматических условиях степной зоны Кабардино-Балкарской Республики, на территории селекционно-семеноводческого участка ССЦ «ОТБОР» (г. Прохладный). Почва участка представлена среднемощным карбонатным черноземом. По механическому составу – тяжелосуглинистая, малогумусная. Содержание гумуса низкое – 3%. Содержание азота (NO_3) среднее – 13,2 мг/кг; подвижного фосфора (P_2O_5) повышенное – 33 мг/кг; обменного калия (K_2O) среднее – 220 мг/кг. Кислотность почв близка к нейтральному значению – 7,4. В качестве источника раннеспелости использовали сорт кукурузы ‘Белоярое Пшено’ (к-5240, Южный Урал), характеризующийся как ультраранеспелый образец (ФАО 130). Классификация ФАО (Jugenheimer, 1979; Kukekov, 1977) используется для определения спелости гибридов кукурузы, где индекс ФАО указывает на суммарное количество тепла, необходимое для полного созревания. Чем ниже значение ФАО, тем раньше культура достигает спелости. Улучшаемыми линиями по признаку раннеспелости служили инбредные линии селекции ССЦ «ОТБОР», используемые как закрепители стерильности М- и С-типов ЦМС. Всего было использовано 10 инбредных линий, относящихся к среднепоздней группе спелости по классификации FAO: А 679 зМ, OL 161 зС МВ, ИКВ 98 зС, Rf 7 зС, РД 4202 зС, РН 53 зС, OL 3104 зМ, OL 3407 зМ, Р 346 зМ, Кр 643 зМ.

Для совмещения сроков цветения инбредных линий и источника ультраскороспелости сорта кукурузы ‘Белоярое Пшено’ (к-5240) в 2021 и 2022 г. посев проводили в разные сроки. Сроки посева сорта ‘Белоярое Пшено’ осуществляли с интервалом в 7–10 дней с первой декады мая до первой декады июля. Посев 10 улучшаемых инбредных линий – закрепителей ЦМС – провели в один срок в первой декаде мая. В гибридных комбинациях и их беккроссах источником пыльцы (♂) являлся сорт кукурузы ‘Белоярое Пшено’, а материнскими формами (♀) – инбредные линии – закрепители ЦМС. После получения BC_1 подсевы сорта кукурузы ‘Белоярое Пшено’ к инбредным линиям и насыщения на гибрид не проводили. В дальнейших исследованиях в качестве исходного селекционного материала для выделения раннеспелых линий использовали потомство расщепляющейся популяции S_1BC_1, представленной 250 образцами.

В качестве контрольной группы использованы районированные раннеспелые и ультраранеспелые гибриды отечественной селекции, внесенные в Госреестр селекционных достижений РФ и допущенные к использованию (https://gossortrf.ru/publication/reestry.php): ‘Кубанский 102МВ’, ‘Кубанский 103МВ’, ‘Кубанская 101СВ’, ‘Обский 150СВ’, ‘Одиссей 230СВ’, ‘Кубанский 390МВ’ селекции ООО «КОС МАИС».

Посев, гибридизацию, самоопыление и уборку урожая проводили вручную. Схема посева гибридов и бекроссов – 70 × 35см, широкорядная, площадь делянки – 4,9 м^2, повторность двукратная, рандомизированная, 15-луночная, по 2 зерна в лунку. В течение вегетации проводили агротехнические мероприятия согласно технологической карте по возделыванию кукурузы (Guidelines for conducting..., 1980). Статическую обработку данных проводили по Б. А. Доспехову (Dospekhov, 2011) при помощи пакета программ Statistica 10.0 (https://1soft.space/en/statsoft-statisica). Фенологические наблюдения и учет урожая зерна проводили по методике ВИР (Shmaraev, Matveeva, 1985). Описание биометрических показателей приведены согласно «Широкому унифицированному классификатору СЭВ вида *Zea mays* L.» (Kukekov, 1977). Уборочную влажность зерна определяли с помощью влагомера «ФАУНА-М».

Тест на холодостойкость проростков (S_1BC_1) проводили в 2023/2024 г. в отделе генетических ресурсов крупяных культур ВИР согласно методическим указаниям ВИР (Khatefov, Matveeva, 2018) с модификацией, в двукратной повторности.

Рост и развитие растений кукурузы проходили при недостатке естественных осадков, повышенной норме среднесуточных температур и солнечной инсоляции в фазу цветения и налива зерна (табл. 1), что не мешало формированию полноценного урожая зерна.

Таблица 1. Количество осадков за сезон в 2021–2024 гг., мм
(по данным метеопункта ССЦ «Отбор», КБР, с. Комсомольское)

Table 1. Amount of precipitation per season in 2021–2024, mm
(according to the meteorological station of OTBOR Ltd., village of Komsomolskoye, Kabardino-Balkaria)

Месяцы / Months	Декады / 10-day periods	2021	2022	2023	2024	Среднее многолетнее / Long-term mean
Май / May	I	3,1	45,7	15,3	23,9	22,0
	II	3,3	6,8	11,1	19,9	10,2
	III	71,7	11,5	2,4	0	21,4
	Всего	78,1	64	28,8	43,8	53,6
Июнь / June	I	58,5	42	27,5	2,3	32,5
	II	40	0	112,7	4,3	39,2
	III	78,7	24,6	15,2	8,4	31,7
	Всего	177	66,6	155,4	15,0	103,5
Июль / July	I	9,3	0	49,9	0	14,8
	II	9,6	0	10,1	0	4,9
	III	32,8	17,6	52	2,7	26,2
	Всего	51,7	17,6	112	2,7	46,0
Август / August	I	7,8	13,6	17,4	25,2	16,0
	II	13,9	0	0	0,8	3,6
	III	5,5	0	0	2,9	2,1
	Всего	27,2	13,6	17,4	28,9	21,7
	II	4,5	15,8	14,3	2	9,1
	III	3,5	1,2	1,8	2,6	2,2
	Всего	12,1	27,7	27,1	10,0	19,2
Всего за год / Total per year		612,0	369,3	534,3	270,0	446,4

Результаты

В 2022 г. была проведена работа по получению гибрида между раннеспелым сортом ‘Белоярое Пшено’ и инбредными линиями кукурузы – закрепителями М- и С-типов ЦМС. Гибридизация проходила в условиях обильного цветения метелок сорта ‘Белоярое Пшено’ и максимального выхода рылец материнских форм из обертков початка. Все гибридные зерновки после созревания характеризовались вишнево-красной окраской зерновок F_1, полученной как доминантный признак от отцовской формы (рис. 1). В контрольном варианте посева без смещения сроков сорт ‘Белоярое Пшено’ вступил в фазу цве-

Рис. 1. Початки кукурузы сорта ‘Белоярое Пшено’ (слева) и его гибрида F_1 с инбредной желтозерной линией Rf 7 зС (справа)

Fig. 1. Maize ears of cv. ‘Beloyaroye Psheno’ (left) and its F_1 hybrid with the inbred yellow-grained line Rf 7 zC (right)

тения в период с 25 июня по 2 июля. Инбредные линии зацвели позже, и фазы цветения продолжались у разных линий от 13 июля (OL 161 зС МВ) по 27 июля (А 679 зМ, Кр 643 зМ).

Беккроссирование гибридов F_1 на сорт кукурузы ‘Белоярое Пшено’ в 2023 г. проводили при совмещении сроков цветения уже с меньшим разрывом. Все гибридные растения показали смещение сроков вступления в фазу цветения раньше исходной улучшаемой линии на 5–8 суток. Сорт кукурузы ‘Белоярое Пшено’ характеризовался низкой высотой стебля (40–60 см) и малым размером початка (6–10 см), ломкостью и полеганием стебля. Все гибриды имели среднюю устойчивость к полеганию, кроме гибрида на линию ИКВ 98 зС, показавшего 100-процентное полегание. Такой результат показывает, что использование сорта ‘Белоярое Пшено’ в гибридной селекции как материнской формы неэффективно из-за неустойчивости к полеганию в комбинации с изученными инбредными линиями. Поэтому сорт кукурузы ‘Белоярое Пшено’ может служить донором раннеспелости для улучшения этих линий только в качестве отцовской формы. Все гибридные комбинации успешно прошли этап беккроссирования и завязали достаточное число гибридных зерен на початке для дальнейшей селекции.

В 2023 г. полученные BC_1 были самоопылены и стали основой для дальнейшей селекции признака раннеспелости и других хозяйственно ценных признаков в инбредных линиях – закрепителях ЦМС, что при этом позволило сократить сроки спелости инбредируемого материала от среднепозднего до ультраннего и раннего по классификации ФАО (Kukekov, 1977). Разрыв в цветении с исходными материнскими формами приведен в таблице 2.

Таблица 2. Динамика смещения продолжительности фенофазы «всходы – цветение метелки» у BC_1-тестеров при насыщении на сорт ‘Белоярое Пшено’ (г. Прохладный, 2023 г.)

Table 2. Dynamics of the changes in the duration of the phenophase from sprouting to panicle flowering in BC_1 testers from saturating crosses between cv. ‘Beloyaroye Psheno’ and maternal lines (town of Prokhladny, 2023)

Наименование материнской линии / Name of the maternal line	Среднее значение признака «всходы – цветение метелки» в эксперименте, дни / Mean value of the period from sprouting to panicle flowering in the experiment, days		Динамика / Dynamics	
	до / before	после / after	Сутки / Days	C_v, %
OL 161 зС МВ	62	49	13	1,30
РД 4202 зС	59	48	11	1,50
ИКВ 98 зС	64	48	16	1.68
РН 53 зС	64	49	15	1.50
OL 3104 зМ	62	51	11	1.44
OL 3407 зМ	65	49	16	2,00
Rf 7 зС	65	52	13	1,88
Р 346 зМ	56	52	4	1,20
А 679 зМ	67	60	7	1,33
Кр 643 зМ	67	53	14	1,71

Результат анализа динамики смещения продолжительности фенофазы «всходы – цветение метелки» у BC_1-тестеров на сорт 'Белоярое Пшено' по U-критерию Манна – Уитни оказался равен 2, а критическое значение U-критерия Манна – Уитни при заданной численности сравниваемых групп составило 23. Следовательно, при 2 ≤ 23 различия уровня признака в сравниваемых группах статистически значимы ($p < 0,05$).

Наиболее значимое сокращение продолжительности периода между наступлением фазы цветения метелки и датой посева показали потомства беккроссов линий ИКВ 98 зС, РН 53 зС, OL 3407 зМ, Кр 643 зМ, а наименьшее – линий Р 346 зМ и А 679 зМ. Следует отметить, что наравне со смещением сроков цветения в более раннюю группу спелости в самоопыленном потомстве S_1BC_1 впервые выщепились початки с ярко-красными и желтыми зерновками (рис. 2).

Для выявления в исходном селекционном материале источников и доноров холодостойкости, переданных от сорта кукурузы 'Белоярое Пшено' инбредным линиям – закрепителям ЦМС, проведено дополнительное лабораторное исследование по определению холодостойкости линий при воздействии на проростки кукурузы, находящейся в фазе трех настоящих листьев, кратковременного положительного температурного стресса. Результаты показали различную устойчивость проростков кукурузы к пониженному температурному воздействию в течение 12 ч (табл. 3).

Анализ выживаемости проростков кукурузы после воздействия пониженными температурами от 0 до +4°С в течение 12 ч показал, что значение U-критерия Манна – Уитни близко к 0, а критическое значение U-критерия Манна – Уитни при заданной численности сравниваемых групп составляет 30. Если 0 ≤ 30, то различия уровня признака в сравниваемых группах статистически значимы ($p < 0,05$). Выделено 5 линий, которые по холодостойкости были равны или выше стандартных гибридов: РД 4202 зС × Белоярое Пшено-17, РД 4202 зС × Белоярое

Рис. 2. **Початки BC_1 (слева) и S_1BC_1 (справа) с красной и желтой окраской зерна**
Fig. 2. **Experimental ears of BC_1 (left) and S_1BC_1 (right) with red and yellow grain color**

Таблица 3. **Выживаемость проростков кукурузы после воздействия пониженными температурами от 0 до +4°С в течение 12 ч, 2023/2024 г.**
Table 3. **Survivability of maize sprouts after exposure to low temperatures from 0 to +4°C for 12 hours, 2023/2024**

Гибрид / Hybrid	Число живых проростков / Number of live sprouts	
	до обработки / before the exposure	после обработки / after the exposure
'Кубанский 102МВ' (контроль)	99,0	47,7
'Кубанский 103МВ' (контроль)	97,2	49,4
'Кубанская 101СВ' (контроль)	97,0	55,8
'Обский 150СВ' (контроль)	99,3	50,1
'Одиссей 230СВ' (контроль)	100	50,5
'Кубанский 390МВ' (контроль)	100	43,3
РД 4202 зС × Белоярое Пшено-17*	98,1	46,7
РД 4202 зС × Белоярое Пшено-35*	100	48,4
РН 53 зС × Белоярое Пшено-7*	100	57,2
Р 346 зМ × Белоярое Пшено-11*	98,5	61,2
А 679 зМ × Белоярое Пшено-26*	100	47,0

Примечание: * – цифра в конце гибридной комбинации обозначает селекционный номер линии
Note: * – the number in the end of the hybrid combination means the breeding number of the line

Пшено-35, А 679 зМ × Белоярое Пшено-26, РН 53 зС × Белоярое Пшено-7, Р 346 зМ × Белоярое Пшено-11 (см. табл. 3).

Среди потомства S_1BC_1 выделены образцы с дифференцированной устойчивостью к пониженным температурам. Но среди этих образцов выщепились единичные проростки с устойчивостью к пониженным температурам, отрастая на 15-е сутки после гибели надземной части проростка, у линий: Р 346 зМ-15; РН-53 зС-2. Выщепление в потомстве S_2BC_1 таких единичных генотипов свидетельствует о необходимости продолжения инбридинга и выделении полностью устойчивых линий к воздействию пониженных температур в сочетании с признаком раннеспелости и ультраранеспелости (рис. 3). Уже первые исследования в этом направлении показали перспективность использования сорта ‘Белоярое Пшено’ в качестве донора раннеспелости и холодостойкости одновременно.

Всего по опыту 2024 г. удалось выделить 7 ультраранних, 58 ранних и 3 среднеранние линии. Все выделенные линии в течении вегетации были инцухтированы для получения S_2BC_1-репродукции, чтобы провести очередной цикл инбредирования и отбора (табл. 4). Из 68 выделенных линий, показавших положительную динамику в смещении спелости в сторону более ранней группы (рис. 4), 40 линий показали слабую и среднюю полегаемость при созревании початка. Все исходные материнские формы – закрепители стерильности, за ис-

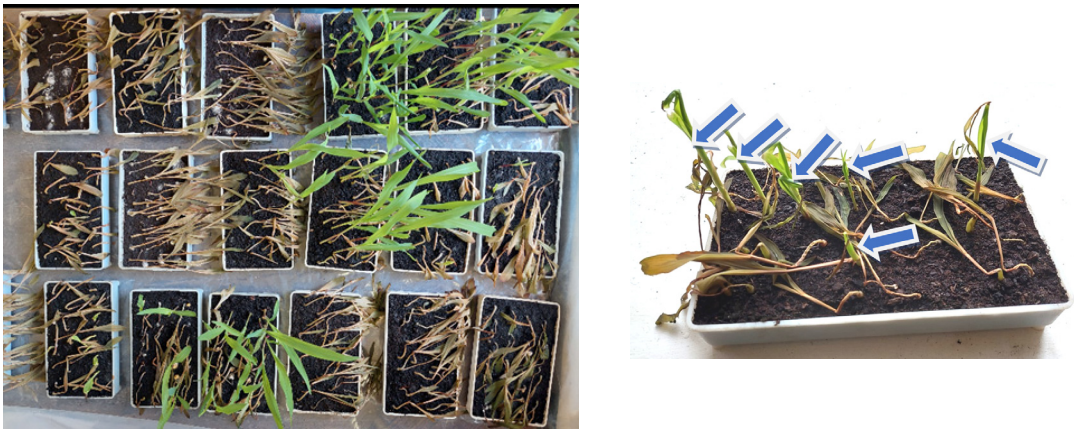


Рис. 3. Реакция проростков кукурузы на 7-е сутки после воздействия пониженной температурой (слева) и отрастание отдельных проростков кукурузы, устойчивых к пониженной температуре на фоне погибших, на 15-е сутки (справа)

Fig. 3. Reaction of maize sprouts on the 7th day after the exposure to low temperature (left) and regrowth of individual maize sprouts resistant to low temperature versus those that died on the 15th day (right)

Таблица 4. Динамика сроков цветения метелки и початка линий S_1BC_1 кукурузы с насыщением на сорт ‘Белоярое Пшено’, 2024 г.

Table 4. Dynamics of the panicle and ear flowering schedule in S_1BC_1 of maize lines from saturating crosses with cv. ‘Beloyaroye Psheno’, 2024

Наименование материнской линии / Name of the maternal line	Группа спелости материнской линии по ФАО / FAO maturity group of the maternal line	Число материнских линий, улучшенных по группе спелости ФАО / Number of maternal lines improved in terms of their FAO maturity group		
		ФАО 100–150 / FAO 100–150	ФАО 151–160 / FAO 151–160	ФАО 201–300 / FAO 201–300
OL 161 зС МВ	170	1	5	–
РД 4202 зС	170	1	10	–
ИКВ 98 зС	180	3	3	–
РН 53 зС	200	1	12	–
OL 3104 зМ	250	–	3	–
OL 3407 зМ	250	1	11	–
Р 346 зМ	300	–	5	–
А 679 зМ	400	–	–	1
Кр 643 зМ	380	–	6	1
Rf 7 зС	550	–-	3	1
Всего	–	7	58	3

Рис. 4. Раннее цветение беккроссов S_1BC_1 с участием сорта ‘Белоярое Пшено’ на фоне исходных материнских (контроль) инбредных линий

Fig. 4. Early flowering of S_1BC_1 backcrosses with the participation of cv. ‘Beloyaroye Psheno’ versus the original maternal (control) inbred lines

ключением линии ИКВ 98 зС, характеризовались высокой устойчивостью к полеганию и перестою на корню после созревания. Сорт ‘Белоярое Пшено’ был неустойчив к полеганию и перестою на корню после созревания и передал этот признак полученным беккроссам. Проведенный инцухт BC_1 позволил индуцировать расщепление в потомстве S_2BC_1 и выделить отдельные устойчивые к полеганию линии. Наибольшую устойчивость к полеганию в беккроссах с сортом ‘Белоярое Пшено’ показала линия Р 346 зМ. Все линии, полученные с участием материнской формы ИКВ 98 зС и сортом ‘Белоярое Пшено’, характеризовались 100-процентным полеганием растений.

Анализ продолжительности вегетационного периода линий S_1BC_1 кукурузы, высеянных рядом с исходными материнскими растениями, показал существенное смещение сроков цветения початка и метелки. Наблюдалось смещение группы спелости выщепившихся линий из среднепоздней в раннюю и ультраннюю группы спелости по классификации ФАО (см. рис. 4). Важно отметить, что наравне с передачей признака раннеспелости сорт ‘Белоярое Пшено’ передает и отрицательные для кукурузы признаки, такие как полегание растений после созревания, низкую высоту растения и прикрепления початка. В процессе селекционного отбора, направленного на удаление из расщепляющегося потомства нежелательных признаков, передаваемых улучшаемым линиям, селекционер может сохранить признак раннеспелости, не нарушив остальные качественные признаки улучшаемой линии.

Заключение

Использование в скрещиваниях сорта ‘Белоярое Пшено’ в качестве источника признака раннеспелости для смещения в сторону более ранний группы спелости у среднепоздних линий кукурузы оказалось эффективным. В результате насыщающих скрещиваний и инбридинга удалось выделить 7 ультраннеспелых (ФАО 100–150), 58 раннеспелых (ФАО 151–160) и 3 среднеранних (ФАО 201–300) линии. Анализ показал, что у улучшаемых линий, наравне с приобретением признака раннеспелости, от донора передаются другие ценные в хозяйственном отношении признаки. Признак холодостойкости, переданный от сорта ‘Белоярое Пшено’, прослеживается у 5 линий, выделенных на этапе S_1BC_1. Присутствие среди средне- и слабоустойчивых к холоду отдельных растений с выраженной устойчивостью к стрессу показывает, что в расщепляющемся потомстве S_2BC_1 можно выделить дополнительно холодостойкие линии, несмотря на гибель большей части проростков. Наравне с полезными признаками, сорт кукурузы ‘Белоярое Пшено’ передал некоторым линиям признак полегаемости растений на корню после созревания зерна. Высокой степенью устойчивости к полеганию характеризовались линии из семей Р 346 зМ и РН 53 зС, а 100-процентной полегаемостью характеризовались линии А 679 зМ и ИКВ 98 зС. В процессе селекционного отбора и последующих сестринских (сибсов) скрещиваний в S_2BC_1 с устойчивыми растениями в пределах семьи можно получить раннеспелые линии с высокой устойчивостью к полеганию.

Коллекция раннеспелых линий кукурузы, выделенная из популяции S_1BC_1 с участием сорта ‘Белоярое Пшено’, будет использована для расширения полиморфизма исходного селекционного материала и создания раннеспелых гибридов кукурузы, адаптированных к агроклиматическим условиям северных регионов степной зоны Северо-Кавказского федерального округа России до 55° северной широты, и увеличения кормовой базы для развития животноводства и птицеводства. Использование сорта ‘Белоярое Пшено’ как донора признака раннеспелости кукурузы способствует эффективному сокращению продолжительности вегетационного периода у среднепоздних линий кукурузы в сторону ранних и ультраранних групп спелости.

References / Литература

Agrios G.N. Diseases of corn. In: G.N. Agrios. *Plant Pathology*. 5th ed. Amsterdam: Elsevier Academic Press; 2004. p.466-468.

Dospekhov B.A. Methodology of field trial (with fundamentals of statistical processing of research results) (Metodika polevogo opyta [s osnovami statisticheskoy obrabotki rezultatov issledovaniy]). 6th ed. Moscow: Alyans; 2011. [in Russian] (Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 6-е изд. Москва: Альянс; 2011).

Guidelines for conducting field experiments with maize (Metodicheskiye rekomendatsii po provedeniyu polevykh opytov s kukuruzoy). Dnepropetrovsk: All-Union Research Institute of Maize; 1980. [in Russian] (Методические реко-

мендации по проведению полевых опытов с кукурузой. Днепропетровск: ВНИИ кукурузы; 1980).

Gulnyashkin A.V., Anashenkov S.S., Varlamov D.V. Selection of maize hybrids adapted to dry conditions of the south of Russia. *Grain Economy of Russia*. 2013;(4):7-11. [in Russian] (Гульняшкин А.В., Анашенков С.С., Варламов Д.В. Селекция гибридов кукурузы, адаптированных к засушливым условиям юга России. *Зерновое хозяйство России*. 2013;(4):7-11).

Guryev B.P., Guryeva I.A. Maize breeding for earliness (Selektsiya kukuruzy na rannespelost). Moscow: Agropromizdat; 1988. [in Russian] (Гурьев Б.П., Гурьева И.А. Селекция кукурузы на раннеспелость. Москва: Агропромиздат; 1988).

Jugenheimer R.W. Corn: improvement, seed production, and uses / transl. from English by G.V. Deryagin, N.A. Emelyanov; G.E. Shmaraev (ed.). Moscow: Kolos; 1979. [in Russian] (Югенхеймер Р.У. Кукуруза: улучшение сортов, производство семян, использование / пер. с англ. Г.В. Дерягина, Н.А. Емельяновой; под ред. Г.Е. Шмараева. Москва: Колос; 1979).

Khatefov E.B., Matveeva G.V. Evaluation of maize accessions for cold resistance (guidelines). St. Petersburg: VIR; 2018. [in Russian] (Хатефов Э.Б., Матвеева Г.В. Оценка образцов кукурузы на устойчивость к холоду (методические указания). Санкт-Петербург: ВИР; 2018). DOI: 10.30901/978-5-905954-83-2

Khoroshilov S.A., Netsvetaev V.P., Voronin A.N. Hereditary differences in maize hybrids with reduced conditional grain moisture (Nasledstvennye razlichiya gibridov kukuruzy s ponizhennoy uslovnoy vlazhnostyu zerna). *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2006;(9):19-20. [in Russian] (Хорошилов С.А., Нецветаев В.П., Воронин А.Н. Наследственные различия гибридов кукурузы с пониженной условной влажностью зерна. *Достижения науки и техники АПК*. 2006;(9):19-20).

Kravtsov V.I., Shimansky L.P. Study of maize initial material on intensity of grain water-yielding capacity during the pre-harvest period. *Arable Farming and Plant Breeding in Belarus*. 2020;(56):352-360. [in Russian] (Кравцов В.И., Шиманский Л.П. Изучение исходного материала кукурузы по интенсивности влагоотдачи зерна в предуборочный период. *Земледелие и селекция в Беларуси*. 2020;(56): 352-360).

Krivosheev G.Ya., Ignatiev A.S., Shevchenko N.A. Selection of early ripe corn hybrids of universal use. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2023;23(10):49-57. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-23-10-49-57

Kukekov V.G. (comp.). Broad unified COMECON list of descriptors and international COMECON list of descriptors for sp. *Zea mays* L. Leningrad: VIR; 1977. [in Russian] (Широкий унифицированный классификатор СЭВ и международный классификатор СЭВ видов *Zea mays* L. / сост. В.Г. Кукеков. Ленинград: ВИР; 1977).

Loginova A.M., Gubin S.V., Getz G.V. Studying the corn hybrids of different ripeness groups in the southern forest-steppe of Omsk region. *Agro-Industrial Complex of Russia*. 2021;28(3):326-331. [in Russian] (Логинова А.М., Губин С.В., Гетц Г.В. Изучение гибридов кукурузы разных групп спелости в условиях южной лесостепи Омской области. *АПК России*. 2021;28(3):326-331).

Orlyanskaya N.A., Orlyansky N.A., Chebotarev D.S. Comparative indexing of early-maturing corn hybrids in multi-environment trial. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2023;24(4):581-591. [in Russian] (Орлянская Н.А., Орлянский Н.А., Чеботарев Д.С. Сравнительная индексация раннеспелых гибридов кукурузы в экологическом испытании. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2023;24(4):581-591). DOI: 10.30766/2072-9081.2023.24.4.581-591

Orlyansky N.A., Zubko D.G., Orlyanskaya N.A. Achievements and prospects of corn selective breeding with a view to earliness of ripening. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2013;2(37):107-111. [in Russian] (Орлянский Н.А., Зубко Д.Г., Орлянская Н.А. Селекция кукурузы на раннеспелость – достижения и перспективы. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2013;2(37):107-111).

Panfilov A.E., Ovchinnikov P.Yu. Grain productivity of corn (*Zea mays* L.) in the Ural region as a function of the precocity of hybrids. *Agro-Industrial Complex of Russia*. 2023;30(2):170-180. [in Russian] (Панфилов А.Е., Овчинников П.Ю. Зерновая продуктивность кукурузы (*Zea mays* L.) в Уральском регионе как функция скороспелости гибридов. *АПК России*. 2023;30(2):170-180). DOI: 10.55934/2587-8824-2023-30-2-170-180

Panfilov A.E., Shepelev S.D., Vysotsky N.Yu. Dependence of quantitative and qualitative parameters of corn productivity on the duration of the growing season of hybrids in the forest-steppe of the Trans-Urals. *Agro-Industrial Complex of Russia*. 2021;28(3):337-344. [in Russian] (Панфилов А.Е., Шепелёв С.Д., Высоцкий Н.Ю. Зависимость количественных и качественных показателей урожайности кукурузы от продолжительности вегетации гибридов в лесостепи Зауралья. *АПК России*. 2021;28(3):337-344).

Panfilov A.E., Zezin N.N., Kazakova N.I. Namyatov M.A. Adaptive approach in maize breeding for the Urals region. *International Journal of Biology and Biomedical Engineering*. 2020;(14):55-62. DOI: 10.46300/91011.2020.14.9

Shcherbak V.S., Zabirova E.R., Khudaikulov A.B. Use of exotic races from Latin America in maize breeding (Ispolzovaniye v selektsii kukuruzy ekzotichekikh ras iz Latinskoy Ameriki). *Agricultural Biology*. 1983;18(1):84-89. [in Russian] (Щербак В.С. Забирова Э.Р., Худайкулов А.Б. Использование в селекции кукурузы экзотических рас из Латинской Америки. *Сельскохозяйственная биология*. 1983;18(1): 84-89).

Shmaraev G.E., Matveeva G.V. Study and maintenance of the maize collection accessions. Guidelines (Izucheniye i podderzhaniye obraztsov kollektsii kukuruzy. Metodicheskiye ukazaniya). Leningrad: VIR; 1985. [in Russian] (Шмараев Г.Е., Матвеева Г.В. Изучение и поддержание образцов коллекции кукурузы. Методические указания. Ленинград: ВИР; 1985).

Sotchenko V.S. Maize breeding, seed production, and cultivation technology (Selektsiya, semenovodstvo, tekhnologiya vozdelyvaniya kukuruzy). Pyatigorsk; 2009. [in Russian] (Сотченко В.С. Селекция, семеноводство, технология возделывания кукурузы. Пятигорск; 2009).

State register of varieties and hybrids of agricultural plants admitted for usage: [website]. [in Russian] (Государственный реестр сортов и гибридов сельскохозяйственных растений, допущенных к использованию: [сайт]. URL: https://gossortrf.ru/publication/reestry.php [дата обращения: 01.04.2025].

StatSoft Russia: [website]. Available from: https://1soft.space/en/statsoft-statisica [accessed Jul. 11, 2023].

Информация об авторах

Тимофей Витальевич Волощенко, научный сотрудник, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, 394087 Россия, Воронеж, ул. Мичурина, 1, TheDrof3cool@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-9208-2635

Антон Дмитриевич Уткин, лаборант-исследователь, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, Acipenser2018samara@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0003-0514-2075

Эдуард Балилович Хатефов, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, haed1967@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0001-5713-2328

Information about the authors

Timofey V. Voloshchenko, Researcher, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, 1 Michurina St., Voronezh 394087, Russia, https://orcid.org/0009-0008-9208-2635

Anton D. Utkin, Laboratory Research Assistant, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, Acipenser2018samara@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0003-0514-2075

Eduard B. Khatefov, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, haed1967@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0001-5713-2328

Вклад авторов: Волощенко Т. С. – проведение, анализ и интерпретация результатов полевых исследований. Уткин А. Д. – проведение, анализ и интерпретация результатов лабораторных исследований. Хатефов Э. Б. – обобщение научного материала; статистический анализ; написание статьи.
Contribution of the authors: Voloshchenko T. S. – field studies; analysis and interpretation of their results. Utkin A. D. – laboratory studies; analysis and interpretation of their results. Khatefov E. B. – generalization of scientific material; statistical analysis; writing of the article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 24.03.2025; одобрена после рецензирования 13.08.2025; принята к публикации 01.09.2025
The article was submitted on 24.03.2025; approved after reviewing on 13.08.2025; accepted for publication on 01.09.2025.

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ СЕЛЕКЦИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Научная статья
УДК 633.283(571.1)
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-209-217

CC BY

‘Чарышская Красавица’ – новый сорт пайзы (*Echinochloa frumentacea* Link) кормового направления для Западной Сибири

А. П. Чебатарев[1, 2], М. В. Чебатарева[1, 3], С. В. Жаркова[2], А. Б. Володин[4]

[1] *Федеральный Алтайский научный центр агробиотехнологий, Барнаул, Россия*

[2] *Алтайский государственный аграрный университет, Барнаул, Россия*

[3] *Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия*

[4] *Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр, Михайловск, Россия*

Автор, ответственный за переписку: Анатолий Павлович Чебатарев, admiral160697@mail.ru

В резко континентальных условиях Западной Сибири, где жаркое и достаточно сухое лето предпочтительно для возделывания нетипичных для местной флоры культур, оптимизация развития животноводства путем расширения незначительного ассортимента малораспространенных кормовых трав и усовершенствование их состава новыми селекционными сортами являются актуальной задачей.
Цель исследования – определение продуктивного и кормового потенциала нового сорта пайзы (*Echinochloa frumentacea* Link). В качестве стандарта использовался сорт ‘Готика’. Экспериментальная часть работы проводилась в течение 2022–2024 гг. на опытных полях Федерального Алтайского научного центра агробиотехнологий, расположенных в лесостепной зоне Приобья Западной Сибири. Сорт изучали путем проведения полевых и лабораторных опытов. За период исследований в конкурсном сортоиспытании (КСИ) сорт ‘Чарышская Красавица’ показал достоверное преимущество перед стандартом по ряду хозяйственно-биологических (+35% по урожайности сухой массы, +27% по урожайности зеленой массы, –6% по срокам созревания, +13% по высоте растений, +13% по степени облиственности) и качественных признаков (+40% по кормовой единице, +11% по перевариваемому протеину, +56% по каротину, +66% по крахмалу). В 2024 г. сорт ‘Чарышская Красавица’ передан на государственное сортоиспытание (ГСИ) в Северо-Западный (2) и Западно-Сибирский (10) регионы.

Ключевые слова: просовидная культура, зеленая масса, устойчивость к засухе, продуктивность, качество

Благодарности: исследование выполнено в рамках договора о научном сотрудничестве с коммерческой организацией ООО «Агро Сиб Сервис».
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Чебатарев А.П., Чебатарева М.В., Жаркова С.В., Володин А.Б. ‘Чарышская Красавица’ – новый сорт пайзы (*Echinochloa frumentacea* Link) кормового направления для Западной Сибири. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(3):209-217. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-209-217

© Чебатарев А.П., Чебатарева М.В., Жаркова С.В., Володин А.Б., 2025

DOMESTIC PLANT BREEDING AT THE PRESENT STAGE

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-209-217

‘Charyshskaya Krasavitsa’ is a new fodder cultivar of barnyard millet (*Echinochloa frumentacea* Link) for Western Siberia

Anatoly P. Chebatarev[1, 2], Maria V. Chebatareva[1, 3], Stalina V. Zharkova[2], Aleksandr B. Volodin[4]

[1] *Federal Altai Scientific Center of Agro-Biotechnologies, Barnaul, Russia*

[2] *Altai State Agricultural University, Barnaul, Russia*

[3] *Altai State University, Barnaul, Russia*

[4] *North-Caucasian Federal Scientific Agrarian Center, Mikhailovsk, Russia*

Corresponding author: Anatoly P. Chebatarev, admiral160697@mail.ru

Under the extreme continental conditions of Western Siberia, where hot and rather dry summers are preferable for the cultivation of crops atypical for the local flora, optimizing the development of animal husbandry by expanding a small range of sparsely distributed forage grasses and improving their composition with new cultivars is an urgent task.
The objective of the study was to assess the productive and feeding potential of a new barnyard millet (*Echinochloa frumentacea* Link) cultivar. Cv. ‘Gotika’ served as the reference. The experimental part of the work was carried out in 2022–2024 in the experimental fields of the Federal Altai Scientific Center of Agro-Biotechnologies located in the forest-steppe zone of the Ob region, Western Siberia. The studies were conducted in the framework of open-field and laboratory experiments. Competitive variety tests showed that cv. ‘Charyshskaya Krasavitsa’ had statistically significant advantages vs. the reference in a number of agronomic and biological aspects (+35% in dry matter yield, +27% in green biomass yield, –6% in maturation time, +13% in plant height, and +13% in foliage percentage), as well as in qualitative characteristics (+40% in feed unit, +11% in digestible protein content, +56% in carotene content, and +66% in starch content). In 2024, ‘Charyshskaya Krasavitsa’ was submitted to the State Variety Trials in the Northwestern (2) and West Siberian (10) Regions.

Keywords: millet crop, green biomass, resistance to drought, productivity, quality

Acknowledgements: the research was performed within the framework of a scientific cooperation agreement with the commercial organization Agro Sib Service LLC.
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Chebatarev A.P., Chebatareva M.V., Zharkova S.V., Volodin A.B. ‘Charyshskaya Krasavitsa’ is a new fodder cultivar of barnyard millet (*Echinochloa frumentacea* Link) for Western Siberia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(3):209-217. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-209-217

Введение

Пайза (*Echinochloa frumentacea* Link) как одна из уникальных просовидных культур (Panicoideae) отличается рядом полезных морфобиологических свойств и признаков (Avetisyan et al., 2020). Это самоопыляемое, с C_4-типом фотосинтеза, однолетнее растение, ареал которого приурочен к более теплым и умеренным поясам обеих полушарий (Nickolaychenko, Zhuzhukin, 2016; Zotikov et al., 2018). Отличается широкой адаптивной способностью, быстро приспосабливается к условиям засоленных и щелочных почв, улучшает их биологическое состояние. Служит одним из ценных высокорослых видов просовидных культур, характеризующихся высокой регенерирующей способностью побега, наличием оптимального сахаропротеинового соотношения и большего содержания перевариваемого протеина на 1 кормовую единицу (85 г пп/КЕ). Пайза устойчива к болезням и вредителям, и в сравнении с основными зерновыми культурами ее физиологическая потребность в элементах питания довольно низкая. Выращивается в основном в Индии, Непале, Китае, Центральной Африке, где используется в качестве корма для скота и птиц (Serekpaev et al., 2016; Cheng et al., 2023). В пищевых целях применение вида ограничено (Kaur, Sharma, 2020).

Столь неширокий, но значимый спектр представленных знаний о таком малораспространенном виде злаковых трав в настоящее время позволяет обоснованно определить дальнейшие перспективы использования пайзы в качестве ценной пищевой, кормовой и сидеральной культуры на фоне критического состояния эколого-экономической обстановки и продовольственной безопасности в некоторых развивающих странах.

Известно, что большинство видов традиционно используемых трав в структуре кормопроизводства не всегда лидируют по питательности и не могут в полной мере удовлетворить потребности животных в зеленой массе за выпасной сезон (Shkodina, Balun, 2023). Продуктивность вегетирующих растений усугубляется неблагоприятным влиянием климата (засуха) и ухудшением состояния почв (эрозия), особенно в полузасушливых и засушливых зонах Казахстана, Индии, в том числе и в отдельных регионах нашей страны (Khusainov, 2013; Barashkova, Ustinova, 2021; Nduku et al., 2021). В этом случае особое внимание в полевом кормопроизводстве уделяется усовершенствованию навыков возделывания не только традиционных многолетних, но и однолетних культур, исключенных производственниками из посевов кормовых севооборотов как энергозатратные, что предусматривает смягчение негативного влияния засухи и дефицита влаги в вегетационный период (Kalyada, Shubskaya, 2019). Правильно подобранные для конкретных почвенно-климатических условий однолетние злаково-бобовые травы, представленные в одно- либо поливидовых ценозах, не только обеспечат получение высококачественных и объемистых кормов для скота в течение всего весенне-летне-осеннего периода, но и смогут повысить экономическую эффективность использования травостоя (Tolmashova, 2009). Появление либо расширение в структуре посевов такой многофункциональной в использовании культуры, как пайза, выступает одним из путей оптимизации полевого кормопроизводства (Petruk, 2014; Reheul et al., 2017; Idrisov, 2023; Zotikov et al., 2023).

На территории Российской Федерации первая информация о пайзе появилась в начале XX века (Khazov, 2019). В Западной Сибири продвижение культуры затруднено ввиду малой осведомленности о ее морфологических особенностях и биологической отзывчивости на предлагаемые условия для дальнейшего определения соответствующих приемов агротехнологии (Bankrutenko, 2013; Avetisyan et al., 2020). С учетом агроэкологических и экономических условий зоны в различных научно-исследовательских институтах и центрах Сибири (Сибирский научно-исследовательский институт кормов РАСХН, Федеральный Алтайский научный центр агробиотехнологий) делаются определенные попытки повышения ее селекционной ценности в местной флоре (Lebedev, Khazov, 2015; Chebotarev, 2023; Chebatarev et al., 2023). На 2024 г. в Государственный реестр сортов и гибридов сельскохозяйственных растений включено 13 сортов пайзы, допущенных к возделыванию по различным регионам России (State Register..., 2024). В связи со сложившейся ситуацией назрела необходимость создания современного сорта пайзы кормового направления, рекомендуемого для возделывания в лесостепной зоне Алтайского Приобья.

Целью работы являлось определение продуктивного и кормового потенциала нового сорта пайзы (*E. frumentacea*) 'Чарышская Красавица'.

Материалы и методы исследования

Конкурсное сортоиспытание (КСИ) на стационарном опытном поле Федерального Алтайского научного центра агробиотехнологий проводили в период 2022–2024 гг. в условиях лесостепной зоны Алтайского края. Посев осуществляли в III декаду мая на черноземных выщелоченных почвах. Учетная площадь делянок – 10 м^2, повторность – 4-кратная. Размещение вариантов и повторностей систематическое, одноярусным методом. Норма высева – 10 г на 10 м^2. Посев произведен селекционной сеялкой ССФК-7, предшественник – чистый пар. Агротехника проведения опытов общепринятая для Западно-Сибирского региона. Укос зеленой массы выполняли в фазу выметывания в два срока (I укос – 18–22.07, II укос – 15–17.08), вручную. Фенологические наблюдения, оценки и учеты осуществляли согласно методике ГСИ (Fedin, 1985). Урожайность пайзы определяли методом сплошного поделяночного учета, биохимический анализ зеленой массы сделан в лаборатории аналитических исследований по общепринятым методикам. Статистическую обработку результативного материала выполняли с использованием дисперсионного анализа (Dospekhov, 2012).

Пайза (*E. frumentacea*) менее требовательна к плодородию почв, чем к теплу и влаге. Первые всходы однолетника отмечаются на 10–12-е сутки при температуре почвы от +10°С и хорошей увлажненности. В начальный период развития неокрепшие всходы растений страдают от сорняков, но позже обильное кущение и широкие листья подросших побегов глушат нежелательные виды трав. Требовательность пайзы к влаге возрастает в период кущения и выхода в трубку, что приходится на конец июня и до конца июля. Идеальный температурный диапазон для пайзы составляет +18–25°С днем и +15–22°С ночью, при котором растения демонстрируют обильный вегетативный рост, характеризующийся высокой отавностью (Zotikov et al., 2018). Первый укос культуры проводят в фазу выметывания метелки, после чего пайза интенсивно отрастает, давая за лето еще 2–3 укоса (Ialovik et al., 2021). Зеленая масса пайзы в данный момент содержит оптимальное количество протеина (12–15%), жира (3%),

сахара (11%) и сухого вещества (28–32%) (Popkov, 2006). В условиях Сибири, где первая половина лета характеризуется дефицитом влаги, она может быстро восстанавливаться с наступлением влажного периода, что весьма важно при выращивании ее в рекомендуемой зоне (Tolmashova, 2009). Урожай зеленой массы достигает 300–760 ц/га (Zotikov et al., 2018; Ialovik et al., 2021).

Переход от вегетативной фазы к репродуктивной происходит быстро, менее чем через 40 суток после появления всходов. Большинство видов *Echinochloa* P. Beauv. растут и обильно цветут в широком диапазоне фотопериодов: растения короткого (8–13 ч) и длинного (16 ч) дня (Bhinda et al., 2023). Пайза – культура короткого дня. В III декаде августа по I декаду сентября проводят уборку созревших семян, урожайность которых составляет 12–37 ц/га. Вегетационный период различных сортов пайзы варьирует от 75 до 120 суток (Ialovik et al., 2021).

Климат лесостепной зоны Приобья умеренно континентальный, лето жаркое и сухое. Среднегодовое количество осадков – 550 мм, сумма активных температур – выше 3300–3600°С. Гидротермический коэффициент увлажнения (ГТК) – 0,9–1,1 (Maksimova et al., 2016; Rotanova et al., 2018).

Погодные условия в черте г. Барнаула с мая по август каждого года (2022–2024) сложились разнообразными, но вполне благоприятными для роста и развития пайзы: средней температуры воздуха было достаточно, наибольший дефицит влаги, отмеченный в мае, компенсировался выпавшими осадками в середине и конце вегетационных периодов 2022–2024 гг. (рис. 1, 2).

Объектом исследований выступал новый сорт пайзы ‘Чарышская Красавица’. В качестве стандарта использовался районированный сорт ‘Готика’ (рис. 3).

Сорт пайзы ‘Чарышская Красавица’ создан совместно Федеральным Алтайским научным центром агробиотех-

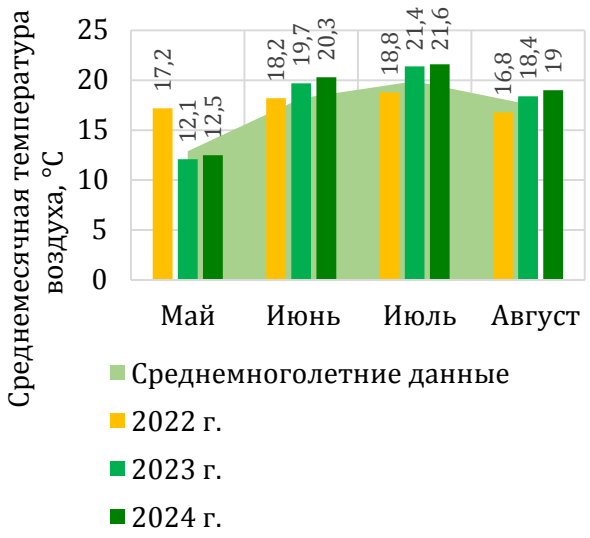


Рис. 1. Средняя температура воздуха (°С) вегетационных периодов с 2022 по 2024 г., Барнаул
Fig. 1. Mean air temperatures (°C) of the growing seasons from 2022 to 2024, Barnaul

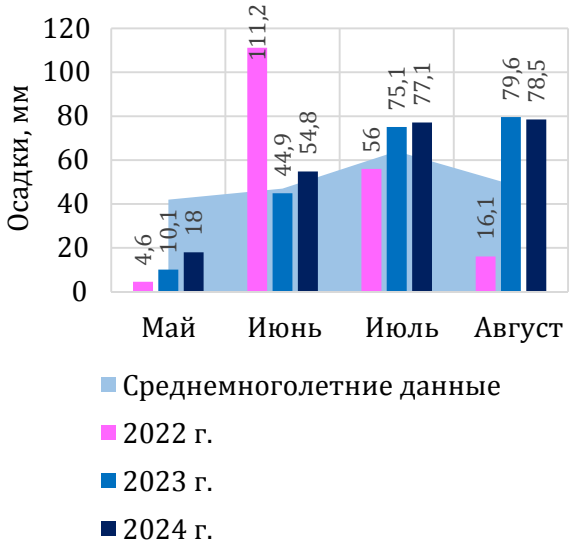


Рис. 2. Средняя сумма осадков (мм) вегетационных периодов с 2022 по 2024 г., Барнаул
Fig. 2. Mean precipitation amounts (mm) of the growing seasons from 2022 to 2024, Barnaul

А Б

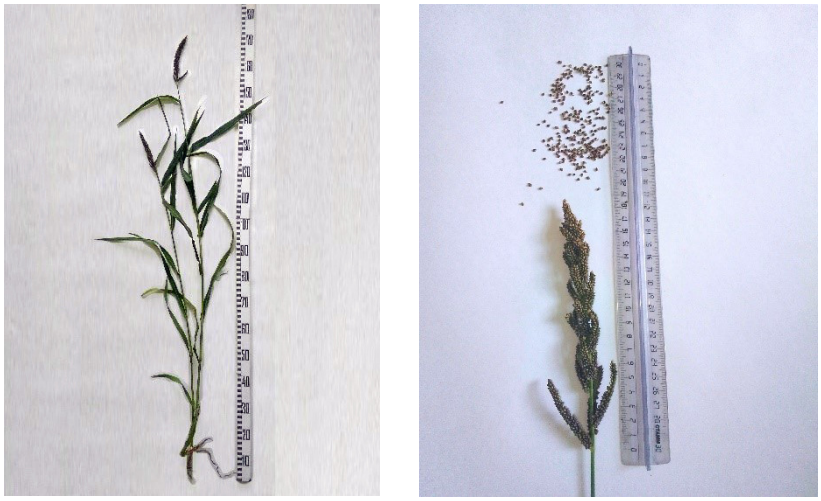
Рис. 3. **Сорта пайзы ‘Чарышская Красавица’ (А) и ‘Готика’ (Б)**
Fig. 3. **Barnyard millet cvs. ‘Charyshskaya Krasavitsa’ (A) and ‘Gotika’ (Б)**

нологий и ООО «Агро Сиб Сервис» методом индивидуального и семейно-массового отбора морфологически близких форм из гибридной популяции (‘Стапайз’ × К-100). Растения сорта имеют следующие морфологические признаки: стабильно высокие темпы начального роста побегов, среднюю степень зеленой окраски листа, прямостоячую форму куста средней кустистости, высокий стебель с метелкой средней толщины, наклоненную метелку со слабым антоциановым окрасом и с короткой шейкой, конусовидную форму метелки средней плотности, светло-бурые колосковые чешуи со слабым антоциановым окрасом, отсутствие остей, серую яйцевидно-округлую зерновку со средней массой 1000 семян и среднюю длительность фазы выметывания (рис. 4).

В качестве стандарта использовался сорт ‘Готика’ (‘Тогузак’ × ‘Омский 88’) селекции Российского научно-исследовательского института сорго и кукурузы и Саратовского государственного аграрного университета. Сорт имеет хорошую засухоустойчивость, является среднеспелым, вегетационный период до I укоса длится 57–78 дней, до созревания – 101–126 дней. Характеризуется средними показателями урожайности сухого вещества (64,7 ц/га) и семян (26,4 ц/га). Идет преимущественно на зернокормовые цели. Сорт ‘Готика’ включен в Госреестр по 12 регионам (патент № 45649, зарегистрирован в Государственном реестре селекционных достижений РФ 11.10.2006).

Результаты и обсуждение

За вегетационные периоды 2022–2024 гг. с учетом фенологических фаз пайзы в КСИ проведена комплексная оценка нового сорта по хозяйственно-биологическим и качественным параметрам. Первые всходы растений отмечены на 11–12-е сутки. При достижении растениями фазы выметывания I укос сортов пайзы проводили во вторую половину лета (15–20 июля), II укос (через 35–40 суток) – в начале осени (1–4 сентября). Вегетаци-



А Б

Рис. 4. **Сорт ‘Чарышская Красавица’: А – растение; Б – метелка и семена**
Fig. 4. **Cv. ‘Charyshskaya Krasavitsa’: A – plant; Б – panicle and seeds**

онный период сортов от появления всходов до полного выметывания и до созревания зерна составил при I укосе посева 52 и 62 суток соответственно; при II укосе – 47 и 39 суток соответственно.

При достижении фазы выхода в трубку сорт 'Чарышская Красавица' сформировал среднюю урожайность зеленой массы выше стандартного сорта 'Готика', обеспечивая достоверную прибавку 1,5 т/га (табл. 1). Сорт достоверно отличался от стандарта по содержанию сухого вещества как в I (2,0 против 1,2 т/га), так и во II укосе (0,7 против 0,5 т/га). Как по урожайности зерна ('Чарышская Красавица' – 1,8 т/га, 'Готика' – 1,3 т/га), так и по массе 1000 семян ('Чарышская Красавица' – 3,2 г, 'Готика' – 3,3 г) оба сорта достоверно не различались. Новый сорт пайзы сформировал высокую степень облиственности в отличие от сорта-стандарта: 44,0 против 38,2%. Высота растений данного сорта на момент скашивания была примерно выравнена с сортом 'Готика', а в период полной спелости прирост длины побега превысил стандарт на 50,8 см. Сорт 'Чарышская Красавица' имел более короткий период вегетации (109 сут.), чем сорт 'Готика' (116 сут.). Устойчивость к полеганию нового сорта соответствует стандарту (по 5 баллов).

В фазу полного выметывания метелки пайзы определен биохимический состав ее сухой массы (табл. 2). В среднем за годы исследований в абсолютно сухом веществе почти во всех генотипах накапливалось значительное количество питательных веществ соответствующей кормовой ценности, за исключением некоторых показателей (воды, клетчатки). Установлены достоверные различия между сортами 'Чарышская Красавица' и 'Готика' по следующим качественным признакам: кормовой единице (0,7 и соответственно 0,5 к. ед.), перевариваемому протеину (51,3 и 46,3 г), каротину (73,0 и 46,8 мг), крахмалу (20,5 и 7,7 г). Новый сорт выделился наибольшими значениями и по другим биохимическим показателям (содержанию протеина – 8,7%, жиру – 1,5%, безазотистых экстрактивных веществ (БЭВ) – 46,5%, золе – 7,0%, сахару – 18,5 г, перевариваемому протеину в 1 к. ед. – 76,5 г, энергетическому обмену – 7,3 МДж/кг), что указывает на пригодность использования сорта в кормовых целях.

Выявлены основные достоинства нового сорта пайзы 'Чарышская Красавица' в сравнении с сортом 'Готика': ускоренное созревание (109 суток), высокорослость на момент полной зрелости семян (167 см), высокая облиственность (44%), наибольшая урожайность зеленой и сухой массы в оба укоса (8,2 т/га и 2,6 т/га соответственно), высокая кормовая единица (0,7 к. ед.), перевариваемый протеин (51,3 г) и каротин (73,0 мг).

Заключение

За период исследований (2022–2024 гг.), проведенных в условиях лесостепной зоны Приобья Западной Сибири, новый сорт пайзы 'Чарышская Красавица' дал достоверную прибавку над стандартным сортом 'Готика' по ряду важных для культуры хозяйственно-морфологических признаков. Превышение показателей сорта-стандарта 'Готика' по урожайности сухой массы составило 35%, урожайности зеленой массы – 27%, высоте растений – 13%, степени облиственности – 13%. Показатели качества зеленой массы сорта 'Чарышская Красавица' превысили уровень стандарта по кормовой единице на 40%, по перевариваемому протеину на 11%, по каротину на 56%, по содержанию крахмала на 66%. Сорт может быть рекомендован для выращивания в Северо-Западном (2) и Западно-Сибирском (10) регионах.

Таблица 1. Хозяйственно-биологические показатели зеленой массы сортов пайзы, среднее за 2022–2024 гг., Барнаул

Table 1. Agronomic and biological indicators of green biomass in the barnyard millet cultivars, average for 2022–2024, Barnaul

Признак \ Сорт		'Готика', стандарт*	'Чарышская Красавица'	Разность	% к st.
Урожайность	зеленой массы $\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$, т/га	4,7 ± 21,5	6,2 ± 16,0	–14,2**	+24
	сухого веществ $\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$, т/га	1,2 ± 3,9	2,0 ± 1,8	–7,7**	+40
	зеленой массы $\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$, т/га	1,4 ± 4,9	2,0 ± 4,4	–7**	+30
	сухого веществ $\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$, т/га	0,5 ± 3,8	0,7 ± 3,3	–2,2**	+29
Высота укоса $\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$, см		106 ± 22,7	130 ± 38,7	–24	+18
Вегетационный период $\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$, сутки		116 ± 2,0	109 ± 2,1	7**	-6
Урожайность зерна $\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$, т/га		1,3 ± 0,4	1,8 ± 0,2	–0,5	+28
Высота на семена $\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$, см		145 ± 5,1	167 ± 5,9	–21,6**	+13
Масса 1000 семян $\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$, г		3,3 ± 0,8	3,2 ± 0,3	0,1	-3
Облиственность $\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$, %		38,2 ± 0,7	44,0 ± 0,8	–5,8**	+13
Устойчивость к полеганию, балл		5,0	5,0	Ft < Fk	–

Примечание: * – сорт стандарт; ** – различия между сортами значимы при p = 0,05

Note: * – reference cultivar; ** – differences between the cultivars are significant at $p = 0.05$

Таблица 2. Биохимический состав сухой массы сортообразцов пайзы, среднее за 2022–2024 гг., Барнаул
Table 2. Biochemical composition of dry matter in the barnyard millet cultivars, average for 2022–2024, Barnaul

Признак \ Сорт		'Готика', стандарт*	'Чарышская Красавица'	Разность	% к st.
Химический состав $\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$, %	воды	9,5 ± 1,6	9,1 ± 0,5	–0,4	–4
	протеина	6,4 ± 0,5	8,7 ± 1,7	2,3	+35
	клетчатки	31,6 ± 0,2	30,0 ± 5,2	–1,6	–4
	жира	1,4 ± 0,4	1,5 ± 0,2	0,1	+7
	БЭВ	40,9 ± 1,0	46,5 ± 3,5	5,6	+14
	золы	6,9 ± 0,6	7,0 ± 0,8	0,1	+1
В 1 кг корма содержится $\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$, г	кормовой единицы (к. ед.)	0,5 ± 0,1	0,7 ± 0,1	0,2**	+40
	перевариваемого протеина	46,3 ± 10,5	51,3 ± 10,6	5**	+11
	каротина, мг	46,8 ± 12,7	73,0 ± 19,2	26,2**	+56
	сахара	16,7 ± 6,7	18,5 ± 2,5	1,8	+11
	крахмала	7,7 ± 4,2	20,5 ± 7,7	12,8**	+66
	перевариваемого протеина в 1 к. ед.	74,8 ± 5,8	76,5 ± 9,9	1,7	+2
ОЭ, $\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$, МДж/кг		6,8 ± 0,7	7,3 ± 0,4	0,5	+7

Примечание: * – сорт стандарт; ** – различия между сортами значимы при p = 0,05
Note: * – reference cultivar; ** – differences between the cultivars are significant at $p = 0.05$

References / Литература

Avetisyan A.T., Baykalova L.P., Artemyev O.S., Martynova O.V. Productivity and feed value of sparsely distributed annual crops. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;548(7):072047. DOI: 10.1088/1755-1315/548/7/072047

Bankrutenko A. Prospects of low-widespread forage crops cultivation in subtaiga zone of Western Siberia. *Vestnik of Buryat State Academy of Agriculture named after V. Philippov*. 2013;2(31):122-125. [in Russian] (Банкрутенко А.В. Перспективы возделывания малораспространенных кормовых культур в подтаежной зоне Западной Сибири. *Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова*. 2013;2(31):122-125).

Barashkova N.V., Ustinova V.V. Meadow forage production and resource-saving methods for increasing the productivity of forage lands in Yakutia (review). *Agricultural Science Euro-North-East*. 2021;22(3):303-316. [in Russian] (Барашкова Н.В., Устинова В.В. Луговое кормопроизводство и ресурсосберегающие приемы повышения продуктивности кормовых угодий Якутии (обзор). *Аграрная Наука Евро-Северо-Востока*. 2021;22(3):303-316). DOI: 10.30766/2072-9081.2021.22.3.303-316

Bhinda M.S., Joshi D.C., Parihar M., Meena R.P., Joshi P., Gupta A. et al. Genetics, breeding, and genomics of Indian barnyard millet (*Echinochloa frumentacea*): status and perspectives. In: M. Farooq, K.H.M. Siddique (eds). *Neglected and Underutilized Crops: Future Smart Food*. Cambridge, MA: Academic Press; 2023. p.115-135. DOI: 10.1016/B978-0-323-90537-4.00017-X

Chebatarev A.P., Volodin A.B., Deines N.V., Zharkova S.V., Chebatareva M.V., Screening of varietal samples of sorghum and millet crops of various ecological and geographical origin in the conditions of the south of Western Siberia. In: *Multifunctional Adaptive Fodder Production: the Collection of Scientific Papers. Issue 31 (79). Proceedings of the International Feed Congress (Lobnya, Moscow Region, June 20–23, 2023)*. Moscow: FGBOU DPO RAKO APK; 2023. p.87-95. [in Russian] (Чебатарев А.П., Володин Н.В., Дейнес Н.В., Жаркова С.В., Чебатарева М.В. Скрининг сортообразцов сорговых и просовидных культур различного эколого-географического происхождения в условиях Юга Западной Сибири. В кн.: *Многофункциональное адаптивное кормопроизводство: сборник научных трудов. Выпуск 31 (79). Материалы Международного конгресса по кормам (Лобня, Россия, 20–23 июня 2023 г.)*. Москва: ФГБОУ ДПО РАКО АПК; 2023. С.87-95). DOI: 10.33814/МАК-2023-31-79-87-96

Chebotarev A.P. Agrobiological evaluation of sorghum and millet crop varieties under the conditions of the forest-steppe of the Altai region's Ob river area. *Bulletin of Youth Science of Altai State Agricultural University*. 2023;(1):33-36. [in Russian] (Чебатарев А.П. Агробиологическая оценка сортов сорговых и просовидных культур в условиях лесостепи Приобья Алтайского края. *Вестник молодежной науки Алтайского государственного аграрного университета*. 2023;(1):33-36).

Cheng Y., Xie X., Wang X., Zhu L., Qiu Q.S., Xu X. Effects of the salt-tolerant gramineous forage *Echinochloa frumentacea* on biological improvement and crop productivity in saline–alkali land on the Hetao Ningxia Plain in China. *Sustainability*. 2023;15(6):5319. DOI: 10.3390/su15065319

Dospekhov B.A. Methodology of field trial with fundamentals of statistical processing of research results (Metodika polevogo opyta s osnovami statisticheskoy obrabotki rezultatov issledovaniy). Moscow: Kniga po trebovaniyu;

2012. [in Russian] (Доспехов Б.А. Методика полевого опыта с основами статистической обработки результатов исследований. Москва: Книга по требованию; 2012).

Fedin M.A. (ed.). Methodology for state crop variety trials (Metodika gosudarstvennogo sortoispytaniya selskokhozyaystvennykh kultur). Moscow; 1985. [in Russian] (Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур / под ред. М.А. Федина. Москва; 1985).

Ialovik L.I., Bavrovskii S.V., Skoptsova T.I. Feed value and the specifics of the paiza cultivation. *Proceedings of the State Agricultural Academy of Velikiye Luki*. 2021;4(37):47-52. [in Russian] (Яловик Л.И., Бавровский С.В., Скопцова Т. И. Кормовое значение и особенности возделывания пайзы. *Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии*. 2021;4(37):47-52).

Idrisov R.M. Impact of global warming on the agro-industrial complex. *Food Policy and Security*. 2023;10(3):423-436. [in Russian] (Идрисов Р.М. Влияние глобального потепления на агропромышленный комплекс. *Продовольственная политика и безопасность*. 2023;10(3):423-436). DOI: 10.18334/ppib.10.3.118467

Kalyada V V., Shubskaya Yu.A. Structural-functional changes of Belarus agrocoenoses in climate warming conditions. *Nature Management*. 2009;(16):122-131. [in Russian] (Коляда В.В., Шубская Ю.А. Структурно-функциональные изменения агроценозов Беларуси в условиях потепления климата. *Природопользование*. 2009;(16):122-131).

Kaur H., Sharma S. An overview of Barnyard millet (*Echinochloa frumentacea*). *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 2020;9(4):819-822.

Khazov M.V. Cultivation of non-traditional fodder crops for feed in the forest-steppe of Western Siberia (Vozdelyvaniye netraditsionnykh kormovykh kultur na kormovye tseli v lesostepi Zapadnoy Sibiri). In: *The Latest Trends in the Development of Agricultural Science in the Works of Young Scientists: Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference (October 15–17, 2019, Novosibirsk)*. Novosibirsk; 2019. p.64-67. [in Russian] (Хазов М.В. Возделывание нетрадиционных кормовых культур на кормовые цели в лесостепи Западной Сибири. В кн.: *Новейшие направления развития аграрной науки в работах молодых ученых: сборник материалов VII международной научно-практической конференции (15–17 октября 2019 года, г. Новосибирск)*. Новосибирск; 2019. С.64-67).

Khusainov A.T. Ecological problems of natural forage land of Kazakhstan as global ecosystem of biosphere. *Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*. 2013;18(2):547-551. [in Russian] (Хусаинов А.Т. Экологические проблемы природных кормовых угодий Казахстана как глобальной экосистемы биосферы. *Вестник Тамбовского университета. Серия: естественные и технические науки*. 2013;18(2):547-551).

Lebedev A.N., Khazov M.V. Cultivation *Aechinochloe frumentacea* Link in the conditions of the northern forest-steppe of Western Siberia. In: *Ecological and Biological Problems of Using Natural Resources in Agriculture: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference for Young Scientists and Specialists (Yekaterinburg, March 13, 2015)*. Yekaterinburg; 2015. p.302-306. [in Russian] (Лебедев А.Н., Хазов М.В. Возделывание пайзы в условиях лесостепи Западной Сибири. В кн.: *Эколого-биологические проблемы использования природных ресурсов в сельском хозяйстве: сборник материалов Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов (Екатеринбург, 13 марта 2015 г.)*. Екатеринбург; 2015. С.302-306).

Maksimova N.B., Arnaut D.V., Morkovkin G.G. The evaluation of heat supply change in the agro-climatic areas of the Altai region. *Bulletin of the Altai State Agricultural University*. 2016:4(138):53-58. [in Russian] (Максимова Н.Б., Арнаут Д.В., Морковкин Г.Г. Оценка измерения теплообеспеченности территории по агроклиматическим районам Алтайского края. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2016:4(138):53-58).

Nduku L., Kalumba A.M., Munghemezulu C., Mashaba-Munghemezulu Z., Chirima G.J., Afuye G.A. et al. Earth observation systems and pasture modeling: a bibliometric trend analysis. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2021;10(11):793. DOI: 10.3390/ijgi10110793

Nickolaychenko N.V., Zhuzhukin V.I. Modern approaches and new methods in breeding at introduction of less common forage species in the arid conditions of the Lower Volga region. *The Agrarian Scientific Journal*. 2016;(9):39-42. [in Russian] (Николайченко Н.В., Жужукин В.И. Современные подходы и новые методы селекции при интродукции малораспространенных видов кормовых культур в засушливых условиях Нижне-Волжского региона. *Аграрный научный журнал*. 2016;(9):39-42).

Petruk V. A. State and problems of Siberia forage production. *Innovations and Food Safety*. 2014;3(5):16-21. [in Russian] (Петрук В.А. Состояние и задачи кормопроизводства Сибири. *Инновации и продовольственная безопасность*. 2014;3(5):16-21).

Popkov A.A. Reserves of maintains of forage base for cattle-breeding. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian Series*. 2006;(1):77-81. [in Russian] (Попков А.А. Резервы укрепления кормовой базы для скотоводства. *Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук*. 2006;(1):77-81).

Reheul D., Cougnon M., Kayser M., Pannecoucque J., Swanckaert J., De Cauwer B. et al. Sustainable intensification in the production of grass and forage crops in the Low Countries of north-west Europe. *Grass and Forage Science*. 2017;72(3):369-381. DOI: 10.1111/gfs.12285

Rotanova I.N., Kharlamova N.F., Baryshnikov S.G. Hydrological risk maps in the atlas of natural hazards in Altai krai. In: *Third Vinogradov Conference. Facets of Hydrology: Proceedings of the International Scientific Conference in Memory of Outstanding Russian Hydrologist Yury Vinogradov (Saint Petersburg, March 28–30, 2018)*. St. Petersburg: St. Petersburg State University; 2018. p.922-927. [in Russian] (Ротанова И.Н., Харламова Н.Ф., Барышников С.Г. Карты гидрологического риска в атласе опасных природных явлений Алтайского края. В кн.: *Третьи виноградовские чтения. Грани гидрологии: сборник докладов международной научно-практической конференции памяти выдающегося русского гидролога Юрия Борисовича Виноградова (Санкт-Петербург, 28–30 марта 2018 года)*. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет; 2018. С.922-927). URL: https://publishing.intelgr.com/archive/hydrology-facets.pdf [дата обращения: 26.02.2025].

Serekpaev N.A., Stybaev G.Zh., Baitelenova A.A., Mukhanov N.K., Votchal L.I. Studying some agricultural practices during the introduction of barnyard millet into the environments of Central Kazakhstan (Izucheniye neko-

torykh agrotekhnicheskikh priyemov pri introduktsii payzy v usloviyakh tsentralnogo Kazakhstana). *Science News of Kazakhstan*. 2016;1(127):166-179. [in Russian] (Серекпаев Н.А., Стыбаев Г.Ж., Байтеленова А.А., Муханов Н.К., Вотчал Л.И. Изучение некоторых агротехнических приемов при интродукции пайзы в условиях центрального Казахстана. *Новости науки Казахстана*. 2016;1(127):166-179).

Shkodina E.P., Balun O.V. Agro-ecological tests of annual fodder crops unconventional for the Novgorod region to strengthen the forage base in the Non-Chernozem zone. *Agrarian Science*. 2023;366(1):56-60. [in Russian] (Шкодина Е.П., Балун О.В. Агроэкологические испытания нетрадиционных для Новгородского региона однолетних кормовых культур для укрепления кормовой базы в Нечерноземной зоне. *Аграрная наука*. 2023:366(1);56-60). DOI: 10.32634/0869-8155-2023-366-1-56-60

State Register of varieties and hybrids of agricultural plants admitted for usage (national list): official publication. Moscow; Rosinformagrotech; 2024. [in Russian] (Государственный реестр сортов и гибридов сельскохозяйственных растений, допущенных к использованию: официальное издание. Москва: Росинформагротех; 2024).

Tolmashova O.G. Paiza reliable protection against illnesses is the basis to receive high-quality forage in Siberia conditions. *The Bulletin of KrasGAU*. 2009;6(33):59-62. [in Russian] (Толмашова О.Г. Надежная защита пайзы от болезней – основа получения высококачественного корма в условиях Сибири. *Вестник КрасГАУ*. 2009;6(33):59-62).

Zotikov V.I., Serekpaev N.A., Stybaev G.Zh., Bajtelenova A.A., Nogaev A.A., Muhanov N.K. Results of introduction of new annual forage crops in the steppe zone of Northern Kazakhstan. *Legumes and Groat Crops*. 2018;4(28):60-67). [in Russian] (Зотиков В.И., Серекпаев Н.А., Стыбаев Г.Ж., Байтеленова А.А., Ногаев А.А., Муханов Н.К. Результаты интродукции новых однолетних кормовых культур в степной зоне Северного Казахстана. *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2018;4(28):60-67). DOI: 10.24411/2309-348X-2018-11051

Zotikov V.I., Sidorenko V.S., Gryadunova N.V., Vilyunov S.D. Millet potential in new market conditions. *Legumes and Groat Crops*. 2023;1(45):5-11. [in Russian] (Зотиков В.И., Сидоренко В.С., Грядунова Н.В., Вилюнов С.Д. Потенциал проса в новых рыночных условиях. *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2023;1(45):5-11). DOI: 10.24412/2309-348X-2023-1-5-11

Информация об авторах

Анатолий Павлович Чебатарев, младший научный сотрудник, Федеральный Алтайский научный центр агробиотехнологий, 656910 Россия, Барнаул, Научный городок, 35, магистрант, Алтайский государственный аграрный университет, 656049 Россия, Барнаул, Красноармейский пр., 98, admiral160697@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-3380-8616

Мария Васильевна Чебатарева, младший научный сотрудник, Федеральный Алтайский научный центр агробиотехнологий, 656910 Россия, Барнаул, Научный городок, 35, аспирант, Алтайский государственный университет, 656049 Россия, Барнаул, пр. Ленина, 61, masha.vorotintseva@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-8799-0681

Сталина Владимировна Жаркова, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Алтайский государственный аграрный университет, 656049 Россия, Барнаул, Красноармейский пр., 98, stalina_zharkova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8410-6715

Александр Борисович Володин, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, доцент, Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр, 356212 Россия, Михайловск, ул. Никонова, 49, tola160697@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2944-4241

Information about the authors

Anatoly P. Chebatarev, Associate Researcher, Federal Altai Scientific Center of Agro-Biotechnologies, 35 Nauchny Gorodok, Barnaul 656910, Russia, MSc Student, Altai State Agricultural University, 98 Krasnoarmeysky Ave., Barnaul 656049, Russia, admiral160697@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-3380-8616

Maria V. Chebatareva, Associate Researcher, Federal Altai Scientific Center of Agro-Biotechnologies, 35 Nauchny Gorodok, Barnaul 656910, Russia, Postgraduate Student, Altai State University, 61 Lenina Ave., Barnaul 656049, Russia, masha.vorotintseva@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-8799-0681

Stalina V. Zharkova, Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Altai State Agricultural University, 98 Krasnoarmeysky Ave., Barnaul 656049, Russia, stalina_zharkova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8410-6715

Aleksandr B. Volodin, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, Associate Professor, North-Caucasian Federal Scientific Agrarian Center, 49 Nikonova St., Mikhailovsk 356212, Russia, tola160697@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2944-4241

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 06.04.2025; одобрена после рецензирования 07.07.2025; принята к публикации 18.08.2025.
The article was submitted on 06.04.2025; approved after reviewing on 07.07.2025; accepted for publication on 18.08.2025.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ПРОБЛЕМ

Научная статья
УДК 631.527.8+631.524.82
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-218-230

CC BY

Triticum ispahanicum Heslot – генетический ресурс для улучшения вида *T. aestivum* L.

А. Е. Дружин[1], С. Н. Сибикеев[1], Е. И. Гультяева[2], З. Е. Фитилева[1], Л. В. Андреева[1]

[1] *Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, Саратов, Россия*

[2] *Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, Санкт-Петербург, Россия*

Автор, ответственный за переписку: Александр Евгеньевич Дружин, alex_druzhin@mail.ru

Актуальность. Изучение *Triticum ispahanicum* Heslot (полба исфаханская) для улучшения *Triticum aestivum* L. актуально и перспективно, так как полба исфаханская редко используется в программах по увеличению генетического разнообразия генофонда мягкой пшеницы.
Материалы и методы. Изучена линия яровой мягкой пшеницы GEN2021-512, полученная в результате скрещивания сорта ‘Добрыня’ и образца *T. ispahanicum* var. *ispahanorufum* Udachin. Проведены генетические, фенологические, фитопатологические и технологические анализы, выполнявшиеся согласно общепринятым методикам.
Результаты. Линия GEN2021-512, устойчивая к листовой ржавчине за счет комбинации гена *Lr*19 и неидентифицированного *Lr*-гена от *T. ispahanicum*, превосходит ‘Добрыню’ и *T. ispahanicum* по продуктивности колоса, длине колоса и массе 1000 зерен. Период «всходы – колошение» на три дня больше, чем у ‘Добрыни’. Продуктивность, качество теста и хлеба на уровне сорта-реципиента ‘Добрыня’, а по содержанию белка и клейковины значимо выше его. Исследование демонстрирует возможность расширения генетической изменчивости мягкой пшеницы за счет использования полбы исфаханской.
Заключение. В результате комбинации генного материала от *T. ispahanicum* var. *ispahanorufum* и яровой мягкой пшеницы сорта ‘Добрыня’ создана линия GEN2021-512, которая благодаря сочетанию устойчивости к возбудителю листовой ржавчины и высоким показателям качества будет использоваться в селекционно-генетических исследованиях как источник для улучшения сортов яровой мягкой пшеницы.

Ключевые слова: мягкая пшеница, полба исфаханская, интрогрессия генов, устойчивость к болезням, хозяйственно полезные признаки

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 1021060407759-2-4.1.6 «Создание и совершенствование системы видов и сортов (гибридов) сельскохозяйственных культур, адаптивных к абиострессорам и устойчивых к основным патогенам, сочетающих высокую потенциальную продуктивность с качеством урожая, с целью снижения экономических рисков в растениеводстве и повышения биоразнообразия в регионе» (FNWF-2022-0003).
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Дружин А.Е., Сибикеев С.Н., Гультяева Е.И., Фитилева З.Е., Андреева Л.В. *Triticum ispahanicum* Heslot – генетический ресурс для улучшения вида *T. aestivum* L. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(3):218-230. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-218-230

© Дружин А.Е., Сибикеев С.Н., Гультяева Е.И., Фитилева З.Е., Андреева Л.В., 2025

IDENTIFICATION OF THE DIVERSITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES FOR SOLVING FUNDAMENTAL AND APPLIED PROBLEMS

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-218-230

Triticum ispahanicum Heslot: a genetic resource for improving the species *T. aestivum* L.

Alexander E. Druzhin[1], Sergey N. Sibikeev[1], Elena I. Gultyaeva[2], Zulfiya E. Fitileva[1], Lubov V. Andreeva[1]

[1] *Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, Saratov, Russia*

[2] *All-Russian Research Institute of Plant Protection, St. Petersburg, Russia*

Corresponding author: Alexander E. Druzhin, alex_druzhin@mail.ru

Background. Studying *Triticum ispahanicum* Heslot (Ispahan emmer wheat) to improve *Triticum aestivum* L. is relevant and promising, since Ispahan emmer is rarely used in programs to increase the genetic diversity of the bread wheat gene pool.
Materials and methods. As part of the study, the GEN2021-512 spring bread wheat line was studied. This line was obtained by crossing cv. 'Dobrynya' with an accession of *T. ispahanicum* var. *ispahanorufum* Udachin. Genetic, phenological, phytopathological and breadmaking analyses were performed using conventional methods.
Results. The GEN2021-512 line is resistant to leaf rust due to a combination of the *Lr19* gene and an unidentified *Lr* gene from *T. ispahanicum* and surpasses 'Dobrynya' and *T. ispahanicum* in ear productivity, ear length, and 1000-grain weight. The line's duration of the period from germination to ear emergence is 3 days longer than that of 'Dobrynya'. Its grain productivity is at the level of the recipient cultivar, but the line has higher protein and gluten content. Dough and bread quality is not lower than in the recipient cultivar. The study demonstrated that the genetic variability of bread wheat might be expanded through Ispahan emmer.
Conclusion. Combining the genetic material of *T. ispahanicum* var. *ispahanorufum* with spring bread wheat cv. 'Dobrynya' resulted in the GEN2021-512 line. This line demonstrated a combination of resistance to the leaf rust pathogen and high breadmaking quality. It is promising for breeding and genetic research as a genetic resource to improve spring bread wheat cultivars.

Keywords: bread wheat, Ispahan emmer, gene introgression, resistance to diseases, useful agronomic traits

Acknowledgements: the study was performed within the framework of the state task, Project No. 1021060407759-2-4.1.6 "Development and improvement of the system of crop species and cultivars (hybrids) adaptive to abiostressors and resistant to major pathogens, combining high potential productivity with harvest quality, in order to reduce economic risks in crop production and increase biodiversity in the region" (FNWF-2022-0003).
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Druzhin A.E., Sibikeev S.N., Gultyaeva E.I., Fitileva Z.E., Andreeva L.V. *Triticum ispahanicum* Heslot: a genetic resource for improving the species *T. aestivum* L. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(3):218-230. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-218-230

Введение

Triticum ispahanicum Heslot (полба исфаханская) является аллотетраплоидом (2n = 4x = 28) с геномным составом BBA^{u}A^u. Высота растений данного вида составляет 90–100 см. Колосья неопушенные, длиной 7–11 см, одноостые, колоски двузерные, распадаются после созревания. Внешние чешуи цветков и колосков ланцетовидно-удлиненные, внутренняя цветковая чешуя укороченная, колоски в колосе расположены асимметрично, зерно удлиненное. Вид был обнаружен в Иране в нескольких селениях дахестана Вазак, расположенного в округе Фаридан, в провинции Исфахан (Западный Иран), на высоте от 2000 до 2500 метров над уровнем моря. Образцы данного вида собраны тремя независимыми экспедициями (Chen et al., 2022).

T. ispahanicum по ряду признаков (морфологические особенности вегетативных органов, строение колоса, трудный обмолот и др.) похож на *T. dicoccum* (Schrank) Schuebl. (Dorofeev et al., 1979; Miller, 1987), но имеет сходство и с *T. polonicum* L.: удлиненные внешние чешуи цветков и колосков, укороченная внутренняя цветковая чешуя, удлиненные зерна и односторонняя ориентация колосков в колосе (Mac Key, 1963; Zhukovsky, Migushova, 1969; Dorofeev et al., 1979). Как следствие, некоторые исследователи, такие как H. Kihara et al. (1965) и H. Kuckuck (1956), включили *T. ispahanicum* в вид *T. polonicum* как подвид, основываясь исключительно на характеристике его длинной колосковой чешуи.

Последние исследования кариотипа *T. ispahanicum* показали близкое сходство в хромосомных характеристиках с азиатскими формами *T. dicoccum* (Badaeva et al., 2015), что, вероятно, появилось вследствие мутации, влияющей на длину колосковой чешуи (ген *P*2 на хромосоме 6A) (Chen et al., 2022). Но таксономическое положение и ранг этого вида все еще остаются не определенными (Khoshbakht, 2009).

Изучение устойчивости этого вида к ряду патогенов показало, что в целом он слабо поражается листовой ржавчиной (возбудитель *Puccinia triticina* Erikss.), но имеет явно расоспецифическую, возрастную устойчивость к этому патогену (Migushova, Zhukovsky, 1969; Grigorieva, 1975), обладает расоспецифической устойчивостью к пыльной головне (возбудитель *Ustilago tritici* (Pers.) C.N. Jensen, Kellerm. & Swingle.), устойчив к твердой головне (возбудитель *Tilletia caries* (DC.) Tul.) (Dorofeev et al., 1979). Растения этого вида в средней степени поражаются мучнистой росой (возбудитель *Blumeria graminis* (DC.) Speer f. sp. *tritici* Marchal), практически устойчивы к стеблевой ржавчине (возбудитель *Puccinia graminis* Pers. f. sp. *tritici* Erikss. et Hen.) и имеют расоспецифическую устойчивость к желтой ржавчине (возбудитель *Puccinia striiformis* West. f. sp. *tritici* Erikss. et Henn.) (Migushova, Zhukovsky, 1969). По другим данным, *T. ispahanicum* довольно сильно поражается возбудителем стеблевой ржавчины (Dorofeev et al., 1979), что также указывает на расоспецифическую устойчивость этого вида к данному патогену.

Исфаханская полба в полевых условиях сильно поражается септориозом (Shaimyardyanov, 1989). Представитель этого вида (к-43064) слабо поражается вирусом полосатой мозаики пшеницы (ВПМП) (Belyanchikova, 1969). Помимо этого, установлено, что гибриды мягкой пшеницы и *T. ispahanicum* var. *ispahanicum* (к-43064) более устойчивы к воздействию тяжелых металлов (кадмию и никелю), и это один из немногих видов, обладающих таким ценным признаком (Barsukova, 1993).

К отрицательным признакам можно отнести ломкость колосового стержня, трудный обмолот и прорастание зерна на корню. Из положительных признаков следует выделить высокую стекловидность зерна и содержание белка в зерне до 25%, а также объем хлеба на уровне сильных пшениц (Dorofeev et al., 1987).

T. ispahanicum обладает частичной генетической совместимостью с гексаплоидными видами пшеницы с геномом BA^{u}D. В ходе экспериментов, проведенных в ВИР, при скрещивании наблюдалось образование до 46,2% гибридных семян (Dorofeev et al.,1987). При скрещивании исфаханской полбы с видом *T. aestivum* завязываемость гибридных зерен колебалась от 4 до 33,5% (Migushova, Zhukovsky, 1969; Chelak, 1978).

Данный вид довольно подробно изучался по вопросам морфогенеза и структурной организации растений (Murashev, Morozova, 2018), а также являлся объектом исследований по идентификации и локализации гена *P*2, контролирующего длинные чешуи (Watanabe et al., 2002; Chen et al., 2022).

В каталоге генных символов пшеницы за 2024 г. (https://wheat.pw.usda.gov/GG3/Wheat_Gene_Catalog_Documents) отсутствуют идентифицированные гены устойчивости, интрогрессированные от вида *T. ispahanicum*, несмотря на то что этот вид изучается на устойчивость к комплексу заболеваний, что указывает на слабую вовлеченность этого вида в селекционно-генетические работы.

Цель работы – изучение влияния генетического материала от *T. ispahanicum* в генофонде *T. aestivum* L. на хозяйственно полезные признаки на примере линии яровой мягкой пшеницы, созданной с участием полбы исфаханской.

Материалы и методы

Исследования проводили в 2011–2024 гг. в Федеральном аграрном научном центре Юго-Востока (ФАНЦ Юго-Востока, г. Саратов). Они включали несколько этапов.

На первом этапе выполнялось скрещивание сорта яровой мягкой пшеницы ‘Добрыня’ (Альбидум 28/Лютесценс401//Саратовская55/3/Л 503, ФАНЦ Юго-Востока) и образца *T. ispahanicum* var. *ispahanorufum* Udachin (к-51762), предоставленного д-ром биол. наук, профессором Саратовского национального исследовательского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского С. А. Степановым[1]. Проведен анализ растений поколения F_1 по устойчивости к возбудителю листовой ржавчины. Также выполнено беккроссирование с сортом-реципиентом ‘Добрыня’. Из популяции F_1BC_1 выделено растение, которое стало родоначальником линии GEN2021-512.

На втором этапе линия и родительские формы оценивали на устойчивость к комплексу заболеваний в полевых условиях на естественном инфекционном фоне и проводили ПЦР-анализ с использованием ДНК-маркеров для идентификации *Lr*-генов.

Подсчет хромосом у линии GEN2021-512 провели в кончиках корешков в митозе в метафазе. Корешки фиксировали в смеси 96-процентного этанола и ледяной уксусной кислоты (3 : 1). В качестве красителя использовали реактив Шиффа (Pausheva, 1988).

Для данной линии изучили 50 препаратов метафазных пластинок. Анализ образцов проводился с использо-

[1] С. А. Степанов получил образец *Triticum ispahanicum* var. *ispahanorufum* Udachin (к-51762) из ВИР.

ванием микроскопа Axio Scope A 1 (Carl Zeiss) с объективом N-ACHROPLAN 40x/0,65.

Третий этап заключался в оценке линии GEN2021-512 на хозяйственно полезные признаки в сравнении с сортом-реципиентом. Исследования проводились в полевых опытах в течение пяти лет (2020–2024 гг.) на экспериментальном поле ФАНЦ Юго-Востока (координаты: 51.599° с. ш., 46.043° в. д.). Почва – выщелоченный чернозем, предшественник – черный пар. В 2020–2021 гг. изучаемый материал высевали вручную на делянки с пятью рядками растений. Норма высева составила 400 зерен/м^2. Уборку проводили вручную с последующим анализом структуры продуктивности. С 2022 по 2024 г. материал высевали с помощью сеялки ССФК-7 в конкурсном сортоиспытании, на 7-рядковых делянках площадью 7 м^2, в 3-кратной повторности, с нормой высева 400 зерен/м^2. Уборку делянок осуществляли с помощью комбайна Hege 125 B. Вегетационные сезоны за годы изучения значительно различались. Наилучшие условия по увлажнению и температуре наблюдались в 2022 и 2023 г.; 2020 и 2021 г. характеризовались умеренной засушливостью. В 2024 г. зафиксирована засуха (табл. 1).

ПЦР-анализа, используя ДНК-маркеры: WR003 F/R гена *Lr1*; SCS5 гена *Lr9*; F1.2245/Lr10-6/r2 гена *Lr10*; Gb SCS265 гена *Lr19*; STS638 гена *Lr20*; Sr24#50, Sr24#12 гена *Lr24*; iag 95 гена *Lr26*; SCS421 гена *Lr28*; Lr29F24 гена *Lr29*, SCM9, csLV34, L34DINT9F: L34MINUSL34PLUS гена *Lr34*, Sr39#22r гена *Lr35*; Ventriup/LN2 гена *Lr37*, GDM35 гена *Lr41* (=*39*), PS10 гена *Lr47*, S13-R16 гена *Lr66.* Характеристика ДНК-маркеров и условий их использования ранее опубликована (Gultyaeva, 2012).

Изучение линии GEN2021-512 и родительских форм по селекционно ценным признакам проводили в 2020–2024 гг. по методике Госсорткомиссии РФ (Fedin, 1989). Для оценки морфологических признаков использовали методику, принятую для Госсорткомиссии РФ, основанную на методике UPOV (https://gossortrf.ru/publication/metodiki-ispytaniy-na-oos.php).

Элементы продуктивности колоса оценивали по методике ВИР (Merezhko et al., 1999).

Оценку качества зерна проводили в ФАНЦ Юго-Востока (г. Саратов) по принятой для Госсорткомиссии РФ методике (Fedin, 1989). Содержание белка и клейковины в зерне определяли на приборе Infratec TM 1241 (Дания), качество и количество сырой клейковины – на приборе

Таблица 1. Погодные условия эксперимента (Саратов, 2020–2024 гг.)
Table 1. Weather conditions of the experiment (Saratov, 2020–2024)

Месяц	2020			2021			2022			2023			2024		
	$\bar{x}$ (°C)	Σ (mm)	ГТК	$\bar{x}$ (°C)	Σ (mm)	ГТК	$\bar{x}$ (°C)	Σ (mm)	ГТК	$\bar{x}$ (°C)	Σ (mm)	ГТК	$\bar{x}$ (°C)	Σ (mm)	ГТК
V	14,9	48	0,5	18,7	38,2	0,7	11,7	31	0,8	16,2	38	0,8	13,8	6	0,1
VI	20,1	81	0,7	21,8	75	1,1	21,0	35	0,55	18,3	60	1,1	23,2	55	0,8
VII	24,4	5	0,6	24,4	45,3	0,6	21,7	74	1,1	22,0	42	0,6	25,0	9	0,1
VIII	19,7	68	0,2	24,5	3,3	0,04	24,1	13	0,2	22,7	26	0,4	21,5	12	0,2

Примечание: $\bar{x}$ – среднесуточная температура воздуха; ∑ – сумма осадков в месяц
Note: $\bar{x}$ – mean daily temperature; ∑ – precipitation amount

Оценку материала по устойчивости к заболеваниям (листовая и стеблевая ржавчина, мучнистая роса) проводили на естественном инфекционном фоне в поле (ФАНЦ Юго-Востока, г. Саратов, 2020–2024 гг.; фитоучасток, Лысогорский район, Саратовская обл., 2020) и на искусственном фоне в условиях фитотрона (листовая ржавчина) (Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений – ВИЗР, г. Санкт-Петербург).

Оценка резистентности к *Puccinia triticina* проводилась по шкале Mains – Jackson (1926). Для определения реакции на заражение *Blumeria graminis* f. sp. *tritici* использовали шкалу Mains – Dietz (1930). Устойчивость к популяции *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* оценивалась по модифицированной шкале Кобба (Roelfs et al., 1992).

Искусственное заражение *Puccinia triticina* проводили по методике ВИЗР (Gultyaeva et al., 2020) саратовской (ПС) и омской (ПО) популяциями, а также тремя тест-клонами, выделенными из популяций, различающихся происхождением и вирулентностью: тест-клон ТК1 (Челябинская обл., 2019 г.); тест-клон ТК2 (Тамбовская обл., 2016 г.); тест-клон ТК3 (Краснодарский край, 2017 г.); ПС (Саратовская обл., 2020 г.); ПО (Омская обл., 2019 г.).

Идентификацию *Lr*-генов устойчивости к листовой ржавчине у линии GEN2021-512 проводили с помощью

ИДК-3 (Россия). На альвеографе Chopin (Франция) определяли реологические свойства теста: P – упругость теста; P/L – отношение упругости теста к растяжимости; W – силу муки. Кроме того, выпекали экспериментальные хлебцы и оценивали объем хлеба и цвет мякиша. Полученные данные обрабатывали с помощью пакета селекционно-генетических программ Agros-2.10, используя дисперсионный анализ с множественными сравнениями по критерию Дункана.

Результаты и обсуждение

Создание и описание линии яровой мягкой пшеницы GEN2021-512

Линия GEN2021-512 получена от скрещивания сорта яровой мягкой пшеницы ‘Добрыня’ и образца *Triticum ispahanicum* var. *ispahanorufum*. Сорт ‘Добрыня’ относится к разновидности *lutescens* Alef. и был взят в качестве материнской формы. Он имеет полупрямостоячий куст. Соломина выполнена слабо, восковой налет слабый. Флаговый лист со слабым восковым налетом и слабой антоциановой окраской ушек. Колос цилиндрический, средней плотности, белый (рис. 1). Зерно удлиненное, красное. Масса 1000 зерен – 30–37 г. Сорт содержит транслокацию

Рис. 1. Колосья и зерновки: 1 – сорт яровой мягкой пшеницы 'Добрыня' (♀); 2 – линия GEN2021-512; 3 – *Triticum ispahanicum* Heslot var. *ispahanorufum* Udachin (♂)

Fig. 1. Ears and grains: 1 – spring bread wheat cv. 'Dobrynya' (♀); 2 – the GEN2021-512 line; 3 – *Triticum ispahanicum* Heslot var. *ispahanorufum* Udachin (♂)

T7DS•7DL-7Ae#1L от *Thinopyrum ponticum* (Podp.) Barkworth et D.R. Dewey (= *Agropyron elongatum* (Host) P. Beauv.), которая несет ген устойчивости к листовой ржавчине *Lr*19 (Gultyaeva et al., 2020). Сорт толерантен к комплексу вирусов, особенно к вирусу желтой карликовости ячменя.

В качестве отцовской формы использовался образец *Triticum ispahanicum* var. *ispahanorufum*. Высота растений за годы изучения была от 70 до 95 см, колос остистый, длиной до 9 см, колосковые чешуи красные, не опушенные, удлиненные, число зерен в колосе колебалось от 10 до 15 шт. Зерно удлиненное, красное (см. рис. 1). Масса 1000 зерен – до 31 г.

Анализ устойчивости образца *T. ispahanicum* var. *ispahanorufum* к местным популяциям патогенов в условиях естественного инфекционного фона показал, что он имеет тип реакции (IT) на местную популяцию *Puccinia triticina* – 3 так же, как и сорт-реципиент 'Добрыня'. Этот образец, как и сорт 'Добрыня', оказался восприимчив к саратовской популяции *P. graminis* (IT = 3) и средневосприимчив к саратовской популяции *Blumeria graminis* (IT = 2) (табл. 2).

В 2010 г. в полевых условиях осуществили гибридизацию сорта 'Добрыня' и *Triticum ispahanicum* var. *ispahanorufum*. Получено 17 гибридных зерен, завязываемость зерен составила 39%. В 2011 г. в тепличных условиях провели анализ гибридного поколения F_1. Всхожесть семян гибридов составила 55%. Растения первого поколения (F_1) демонстрировали промежуточные характеристики: колос без остей, но с небольшими остевидными отростками (до 5 мм). Отличительной чертой, по сравнению с сортом 'Добрыня', была красная окраска колосковых чешуй. Зерно имело удлиненную форму и красный цвет. Оценка устойчивости растений F_1 к возбудителю бурой ржавчины (*Puccinia triticina*) показала их высокую резистентность (тип реакции IT = 0). В дальнейшем провели возвратное скрещивание (беккроссирование) гибридов F_1 с сортом 'Добрыня'.

В 2011 г. на искусственном инфекционном фоне из популяции F_1BC_1 отобрано растение, демонстрирующее характеристики, свойственные *Triticum aestivum*, такие как неломкий колос, легкий обмолот и средняя плотность колоса. Это растение обладало устойчивостью к *Puccinia triticina* и стало родоначальником линии GEN2021-512 (Добрыня/*T. ispahanicum*//Добрыня).

Цитогенетическое исследование линии GEN2021-512 показало наличие у нее 42 хромосом (рис. 2).

По своим морфологическим признакам эта линия классифицируется как var. *albidum* Körn. Растение имеет полупрямостоячий тип куста. Соломина слабо выполнена, с небольшим восковым налетом. Флаговый лист также характеризуется слабым восковым налетом. Колос веретеновидный, средней плотности, белого цвета, неломкий и безостый. Обмолот происходит легко. Зерно имеет удлиненную форму и белый цвет (см. рис. 1). Масса 1000 зерен – от 30 до 36 г. Происхождение белой окраски зерна у линии обусловлена неаллельным взаимодействием генов, отвечающих за красный цвет зерна у исходных образцов, что довольно часто наблюдается в нашей практике при скрещивании *T. aestivum* с тетраплоидными видами.

Генетический контроль устойчивости линии GEN2021-512 к *P. triticina*

На искусственно созданном инфекционном фоне все растения поколения F_1, полученного от скрещивания Добрыня/*T. ispahanicum*, демонстрировали устойчивость к *Puccinia triticina*, проявляющуюся как тип реакции IT = 0. Важно отметить, что исходные родительские формы были восприимчивы к этому патогену (IT = 3). Фитопатологический анализ указывает на интрогрессию генного материала от образца *Triticum ispahanicum* var.

Таблица 2. **Характеристика линии GEN2021-512 и ее родительских форм по устойчивости к патогенам**
Table 2. **Characterization of the GEN2021-512 line and its parent forms according to their resistance to pathogens**

Образец / Accession	Тип реакции на заражение изолятами и популяциями / Type of the reaction to the infection caused by isolates and populations					
Puccinia triticina						
	ПО19*/PO19	ТК1 *pp9*	ТК3 *pp26*	ТК2 *pp19*	ПС09/PS09	ПС20/PS20
	2019 г.				2009 г.	2020 г.
‘Добрыня’	0	0	0	3	3	3
GEN2021-512	0	0	0	0	–	0
Triticum ispahanicum var. *Ispahanorufum*	–	–	–	–	3	3

Puccinia graminis			
	Саратовская популяция / Saratov population		Лысогорская популяция / Lysye Gory population
	2009 г.	2020 г.	2020 г.
‘Добрыня’	3	3	4
GEN2021-512	–	3	4
Triticum ispahanicum var. *ispahanorufum*	3	3	–

Blumeria graminis		
	Саратовская популяция / Saratov population	
	2009 г.	2022 г.
‘Добрыня’	2	2
GEN2021-512	–	2
Triticum ispahanicum var. *ispahanorufum*	2	2

Примечание: ПО19 – омская популяция 2019 г.; ПС09, ПС20 – саратовская популяция 2009 и 2020 г.; ТК1 – тест-клон, Челябинская обл., 2019 г.; ТК2 – тест-клон, Тамбовская обл., 2016 г.; ТК3 – тест-клон, Краснодарский край, 2017 г.

Note: PO19 – Omsk population, 2019; PS09 and PS20 – Saratov population, 2009 and 2020; ТК1 – test clone, Chelyabinsk Province, 2019; ТК2 – test clone, Tambov Province, 2016; ТК3 – test clone, Krasnodar Territory, 2017

Рис. 2. **Кариотип линии GEN2021-512**
Fig. 2. **Karyotype of the GEN2021-512 line**

ispahanorufum в сорт 'Добрыня' и вероятную комбинацию гена или генов устойчивости, унаследованных от этого образца, с геном *Lr*19 от сорта 'Добрыня'.

В 2012 г. на искусственном инфекционном фоне выполнили генетический анализ гибридов F_2, полученных от комбинации Добрыня/*T. ispahanicum*//Добрыня. Наблюдаемое (фактическое) расщепление растений по признаку устойчивости к *Puccinia triticina* составило 132 устойчивых и 89 восприимчивых, что близко к теоретически ожидаемому соотношению 9R : 7S. Критерий соответствия между теоретическими и фактическими данными ($\chi2$ = 1,087) не превышал табличного значения $\chi2$ для df1 = 3,84. На основании этих данных можно утверждать, что устойчивость линии GEN2021-512 обусловлена взаимодействием двух комплементарных генов: *Lr19* от сорта 'Добрыня' и неидентифицированного *Lr*-гена (или генов) от *Triticum ispahanicum* var. *ispahanorufum*. Идентичные результаты по комплементарному взаимодействию гена *Lr19* с другими *Lr*-генами, в том числе и неидентифицированными, встречались в наших предыдущих исследованиях (Gultyaeva et al., 2020). Фитопатологические исследования подтвердили, что устойчивость линии GEN2021-512 эффективна против патогена на всех стадиях развития растений, как в фазе проростков, так и у взрослых растений.

Идентификация генов устойчивости к *Puccinia triticina* и *P. graminis*

Для подтверждения и идентификации *Lr*-генов у линии GEN2021-512 проведен ПЦР-анализ с использованием 17 ДНК-маркеров *Lr*-генов. Этот молекулярный скрининг позволил выявить наличие гена *Lr*19, унаследованного от сорта 'Добрыня'. Мука, полученная из зерна этой линии, имеет желтый цвет, что служит дополнительным подтверждением присутствия *Lr*19, поскольку гены, определяющие этот признак, находятся в тесной связи с геном *Lr*19 (Prins et al., 1996). Несмотря на то что ген *Lr*19 утратил свою эффективность против *Puccinia triticina* в Саратовской области еще в 1994 г., мониторинг последних десятилетий показывает, что частота патотипа *pp*19 в саратовской популяции патогена варьируется в диапазоне от 0 до 20% (Gultyaeva et al., 2020). К сожалению, идентифицировать другие гены устойчивости к листовой ржавчине, полученные от *Triticum ispahanicum* var. *ispahanorufum*, с помощью имеющегося набора ДНК-маркеров не удалось, что, вероятно, связано с тем, что эти гены еще не идентифицированы.

Параллельно с этим у изучаемой линии проводилась идентификация *Sr*-генов с использованием ДНК-маркеров, рекомендованных для маркер-вспомогательной селекции (MAS) и специфичных для генов *Sr*2, *Sr*25, *Sr*26, *Sr*28, *Sr*31, *Sr*32, *Sr*35, *Sr*36, *Sr*38, *Sr*57. Анализ выявил присутствие только гена *Sr*25, который тесно сцеплен с геном *Lr*19. Работа по идентификации *Lr*- и *Sr*-генов у данной линии проведена в ходе выполнения исследований по гранту РФФИ № 18-016-00170А.

Оценка линии GEN2021-512 по устойчивости к заболеваниям

Устойчивость линии GEN2021-512 к возбудителю листовой ржавчины была подтверждена и при оценке на искусственном инфекционном фоне с применением тест-клонов (ТК1, ТК2, ТК3) и популяций патогена (ПО19, ПС20), различающихся по генам вирулентности (Gultyaeva et al., 2020). Установлено полное отсутствие симптомов поражения (IT = 0) у линии при заражении всеми использованными тест-клонами и популяциями патогена, в отличие от сорта 'Добрыня' (IT = 3 на ТК2 и ПС20) (см. табл. 2).

Исследование устойчивости линии к двум популяциям возбудителя стеблевой ржавчины (*Puccinia graminis*) (саратовской и лысогорской) показало ее восприимчивость к обеим популяциям. Сорт 'Добрыня' (с геном *Sr*25) продемонстрировал аналогичную реакцию. Приведенные выше данные по идентификации *Sr*-генов подтвердили наличие гена устойчивости *Sr*25 у линии GEN2021-512, который эта линия унаследовала от сорта-реципиента 'Добрыня'.

По устойчивости к возбудителю мучнистой росы линия GEN2021-512 была на уровне сорта-реципиента 'Добрыня'.

Влияние генного материала *Triticum ispahanicum* на хозяйственно полезные признаки у линии GEN2021-512

Помимо устойчивости к патогенам, важно так же изучить влияние генного материала от *Triticum ispahanicum* var. *ispahanorufum* у линии GEN2021-512 на хозяйственно полезные признаки. Изучение линии показало, что средняя продолжительность периода «всходы – колошение» у линии GEN2021-512 составила 45 дней за три года наблюдений, что на три дня превышает показатель сорта 'Добрыня' и на два дня меньше, чем у *T. ispahanicum* var. *ispahanorufum*. По этому признаку линия занимает промежуточное положение, значимо отличаясь от обеих родительских форм (табл. 3). Высота растений линии GEN2021-512 в среднем была 87 см, практически не отличалась от высоты сорта 'Добрыня' (86,6 см), но существенно превосходила *T. ispahanicum* var. *ispahanorufum* (81,6 см).

Что касается устойчивости к полеганию, линия GEN2021-512 проявляет большую устойчивость, чем *T. ispahanicum* var. *ispahanorufum*, и находится на одном уровне с сортом 'Добрыня' (см. табл. 3). Анализ влияния интрогрессии от *T. ispahanicum* var. *ispahanorufum* в сорт 'Добрыня' на примере линии GEN2021-512 выявил значимое изменение только в продолжительности периода «всходы – колошение», в то время как высота растений и устойчивость к полеганию не претерпели существенных изменений по сравнению с реципиентом.

Анализ элементов продуктивности колоса показал, что некоторые показатели очень сильно зависят от условий вегетационного сезона (табл. 4). Так, длина колоса у линии GEN2021-512 в зависимости от года колебалась от 9,6 до 12,1 см, но ежегодно значимо превосходила по этому показателю сорт 'Добрыня' (8,4–10,6 см) и образец *T. ispahanicum* var. *ispahanorufum* (6,9–8,1 см) (см. табл. 4).

Число колосков в колосе у линии GEN2021-512 варьировало от 16,6 до 18,9 и ежегодно было на уровне сорта-реципиента, но значимо выше, чем у образца *T. ispahanicum* var. *ispahanorufum* (9,5–10,4). По числу зерен в колосе наблюдалась схожая картина, что и по числу колосков в колосе. По признаку плотности колоса линия GEN2021-512 значимо уступала ежегодно сорту-реципиенту, но значимо превосходила по этому показателю образец *T. ispahanicum* var. *ispahanorufum*. По озерненности колоска линия GEN2021-512 значимо не отличалась от сорта 'Добрыня' как в 2023, так и в 2024 г., но значимо превосходила образец *T. ispahanicum* var. *ispahanorufum*. Масса зерна с колоса у линии GEN2021-512 в 2023 г. была значимо выше, чем у сорта-реципиента и образца *T. ispahanicum* var. *ispahanorufum*, но в 2024 г. линия и сорт 'Добрыня'

Таблица 3. Характеристика линии GEN2021-512 и ее родительских форм по морфологическим и фенологическим параметрам, а также по продуктивности зерна (Саратов, 2021–2024 гг.)

Table 3. Characterization of the GEN2021-512 line and its parent forms according to morphological/phenological parameters and grain productivity (Saratov, 2021–2024)

Образец / Accession	2021		2022		2023		2024		среднее
		min–max		min–max		min–max		min–max	
Высота растений, см / Plant height, cm									
‘Добрыня’	79,5b	76–84	94,8b	89–98	98,2b	95–105	73,8b	69–77	86,6b
Triticum ispahanicum var. *ispahanorufum*	70,2a	67–72	91,0a	87–93	95,0a	90–100	70,0a	65–72	81,6a
GEN2021-512	78,0b	76–82	96,0b	90–101	98,5b	96–106	75,5b	70–81	87,0b
HCP	2,503		2,021		1,871		2,865		2,583
Устойчивость к полеганию, балл / Resistance to lodging, score									
‘Добрыня’	4,5c	4,0–4,8	4,8b	4,3–5,0	4,2b	4,0–4,5	4,5b	4,0–4,9	4,50b
Triticum ispahanicum var. *ispahanorufum*	3,9a	3,3-4,0	3,9a	3,5–4,0	3,7a	3,5–4,0	3,8a	3,5–4,0	3,83a
GEN2021-512	4,2b	4,0–4,7	4,8b	4,4–5,0	4,3b	4,1–4,6	4,3b	4,1–4,7	4,40b
HCP	0,261		0,316		0,271		0,260		0,250
Продолжительность периода «всходы – колошение», дней / Duration of the period from germination to ear emergence, days									
‘Добрыня’	38a	38–38	44a	43–44	45a	45–45	41a	41–41	42,0a
Triticum ispahanicum var. *ispahanorufum*	44b	43–45	49c	48–50	50c	49–51	46c	45–47	47,3c
GEN2021-512	43b	42–44	47b	46–48	48b	47–49	43b	43–43	45,3b
HCP_{05}	2,012		1,506		1,712		1,051		1,117
Масса 1000 зерен, г / 1000-grain weight, g									
‘Добрыня’	28,2a	26–30	34,0b	32–37	36,3b	35–40	31,1a	30–35	32,40a
Triticum ispahanicum var. *ispahanorufum*	30,0ab	29–32	31,6a	30–33	32,3a	30–35	31,2a	30–33	31,27a
GEN2021-512	31,9c	29–33	36,4c	34–39	36,5b	35–40	34,9b	32–36	34,93b
HCP_{05}	2,125		2,250		2,512		2,451		2,366
Продуктивность зерна, г/м² / Grain yield, g/m²									
‘Добрыня’	–	–	317,4ns		279,0a		222,3b		272,9ns
GEN2021-512	–	–	324,4ns		295,6b		188,8a		269,6ns
HCP_{05}	–	–	NS		15,6		33,1		NS

Примечание: числа в колонках, сопровождаемые различными буквами, различаются при уровне значимости 0,05, согласно множественным сравнениям по Дункану; *lim* – верхний и нижний предел

Note: the numbers accompanied by different letters in the columns differ at a significance level of 0.05, according to Duncan’s multiple comparisons; *lim* – upper and lower limits

Таблица 4. **Характеристика линии GEN2021-512, сорта 'Добрыня' и образца *Triticum ispahanicum* Heslot var. *ispahanorufum* Udachin по элементам продуктивности колоса** (Саратов, 2023–2024 гг.)

Table 4. **Characterization of the GEN2021-512 line, cv. 'Dobrynya', and the accession of *Triticum ispahanicum* Heslot var. *ispahanorufum* Udachin according to ear productivity components** (Saratov, 2023–2024)

Образец / Accession	Длина колоса, см / Ear length, cm	Число колосков, шт. / Number of spikelets, pcs.	Число зерен в колосе, шт. / Number of grains per ear, pcs.	Плотность колоса / Ear density	Масса зерна в колосе, г / Grain weight per ear, g	Озерненность колоска / Number of grains per spikelet	Масса 1000 зерен, г (расчетная) / 1000-grain weight, g (estimated)
2023 г.							
'Добрыня'	10,63 b	18,29 b	53,0 b	1,71 c	1,97 b	2,89 b	37,70b
GEN2021-512	12,15 c	18,92 b	53,43 b	1,51 b	2,17 c	2,82 b	40,80c
Triticum ispahanicum var. *ispahanorufum*	8,11a	10,4 a	13,2 a	1,20a	0,43 a	1,26 a	31,80a
$НСР_{05}$	1,284	1,034	2,326	0,081	0,137	0,862	2,820
2024 г.							
'Добрыня'	8,44 b	16,06 b	37,86 b	1,89 c	1,42 b	2,36 b	37,58b
GEN2021-512	9,62 c	16,64 b	36,07 b	1,72 b	1,32 b	2,17 b	36,52b
Triticum ispahanicum var. *ispahanorufum*	6,95 a	9,5 a	11,1 a	1,35 a	0,34 a	1,16 a	30,00a
$НСР_{05}$	1,140	2,023	3,064	0,102	0,151	0,821	2,174

Примечание: числа в колонках, сопровождаемые различными буквами, различаются при уровне значимости 0,05, согласно множественным сравнениям по Дункану

Note: the numbers accompanied by different letters in the columns differ at a significance level of 0.05, according to Duncan's multiple comparisons

между собой значимо не различались, а с образцом *T. ispahanicum* var. *ispahanorufum* имели значимые различия не в пользу последнего. Расчетная масса 1000 зерен у изучаемой линии была значимо выше, чем у образца *T. ispahanicum* var. *ispahanorufum*, но на одном уровне (2024 г.) или значимо выше (2023 г.), чем у сорта 'Добрыня'.

Также было отмечено, что фактическая масса 1000 зерен у линии GEN2021-512 в среднем за четыре года была значимо выше, чем у сорта 'Добрыня' и образца *T. ispahanicum* var. *ispahanorufum* (см. табл. 3). Более высокая масса 1000 зерен у линии GEN2021-512 по сравнению с ее родительскими формами отмечалась ежегодно, кроме 2023 г., когда по этому показателю эта линия и сорт 'Добрыня' практически не различались.

Продуктивность линии GEN2021-512 и сорта 'Добрыня' изучали в конкурсном сортоиспытании в условиях, приближенных к производственным посевам, без сравнения с образцом *T. ispahanicum* var. *ispahanorufum*, так как заранее было известно, что он менее продуктивный. Основной целью данной оценки являлось сравнение интрогрессивной линии с сортом-реципиентом для выявления эффектов интрогрессии от *T. ispahanicum* var. *ispahanorufum* и определения селекционной ценности линии GEN2021-512 (см. табл. 3). Анализ продуктивности проводился в течение трех лет, и в среднем за этот период линия GEN2021-512 и сорт 'Добрыня' значимо не различались, но при изучении этого показателя по годам отмечено, что в наиболее благоприятные по количеству осадков и температурному режиму годы линия GEN2021-512 по продуктивности была на уровне сорта-реципиента (2022 г.) или значимо выше его (2023 г.), но в условиях 2024 г., когда отмечались засушливые явления в период налива зерна, эта линия значимо уступила сорту 'Добрыня'.

Известно, что содержание белка в зерне у *T. ispahanicum* var. *ispahanorufum* доходит до 25%, а по объему хлеба соответствует показателям сильных пшениц (Dorofeev et al., 1987). Исследований по влиянию этого вида на хлебопекарное качество генотипов, полученных от скрещиваний *T. aestivum*/*T. ispahanicum*, мы, к сожалению, не нашли в доступной нам литературе. В этой связи результаты, полученные нами по оценке линии GEN2021-512 по показателям качества, могут в некоторой степени раскрыть этот вопрос. Следует отметить, что линия сравнивалась с сортом-реципиентом 'Добрыня', который по показателям качества муки и хлеба Госсорткомиссией РФ отнесен к сильным пшеницам (табл. 5).

Оценка линии GEN2021-512 по содержанию белка в зерне и процент-клейковины показала, что она значимо превышает по этим показателям сорт 'Добрыня'. Качество клейковины у линии GEN2021-512 в среднем за годы изучения было на уровне сильных пшениц (75 ед. ИДК 3), в то же время у сорта 'Добрыня' этот показатель находился на уровне хорошего филлера (80 ед. ИДК 3). Не выявлено статистически значимых различий между линией и сортом-реципиентом по упругости теста (P) и отношению упругости к растяжимости (P/L). По пока-

Таблица 5. **Характеристика линии GEN2021-512 и сорта ‘Добрыня’ яровой мягкой пшеницы по хлебопекарным качествам, в среднем за 2022–2024 гг.**

Table 5. **Characterization of the GEN2021-512 line and spring bread wheat cv. ‘Dobrynya’ according to their breadmaking qualities, average for 2022–2024**

Образец / Accession	Клейковина / Gluten		Белок, % / Protein, %	Показание альвеографа / Physical properties of dough (alveograph)			V, см³ / V, cm³	Цвет мякиша / Crumb color
	Content, %	ИДК-3/ Strength		P, мм / P, mm	P/L	W, е. а./ W, a. u.		
‘Добрыня’	37,12a*	79,60b	16,26a	84,70 ns	1,17 ns	265 ns	810 ns	желтый
GEN2021-512	44,06b	74,60a	18,08b	84,13 ns	0,99 ns	293 ns	795 ns	желтый
$\bar{x}$	40,59	77,10	17,17	84,42	1,08	279,0	797,5	
$НСР_{05}$	4,575	3,448	1,819	NS	NS	NS	NS	

Примечание: числа в колонках, сопровождаемые различными буквами, различаются при уровне значимости 0,05; P – упругость теста; P/L – отношение упругости теста к растяжимости; W – сила муки; V – объем хлеба; е. а. – единицы альвеографа

Note: the numbers accompanied by different letters in the columns differ at a significance level of 0.05; P – dough elasticity; P/L – dough elasticity/extensibility ratio; W – flour strength; V – bread volume; a. u. – alveograph units

зателям «силы» муки и объема хлеба линия GEN2021-512 и сорт-реципиент между собой значимо не различались, но по «силе» муки линию можно отнести к группе сильных пшениц, а сорт ‘Добрыня’ – к группе ценных (см. табл. 5). Полученные данные по влиянию интрогрессии от *T. ispahanicum* var. *ispahanorufum* на хлебопекарные качества на примере линии GEN2021-512 показали, что при использовании сорта ‘Добрыня’ в качестве реципиента не происходит ухудшения основных показателей качества, а по некоторым произошло даже улучшение.

Также отмечены некоторые особенности линии GEN2021-512. В частности, тесто из муки этой линии обладало большей эластичностью при замесе, а хлеб, получивший оценку 5, имел желтую окраску мякиша, как и у сорта ‘Добрыня’, и по органолептическим и вкусовым особенностям также был высоко оценен, обладал тонким и приятным ароматом (рис. 3).

Заключение

В результате многолетней работы создана линия GEN2021-512 от скрещивания образца вида *T. ispahanicum* var. *ispahanorufum* и сорта яровой мягкой пшеницы ‘Добрыня’. Линия обладает рядом селекционно ценных признаков: устойчивостью к возбудителю листовой ржавчины, более коротким периодом «всходы – колошение», повышенной массой 1000 зерен (в отдельные годы), а также высокими технологическим показателям качества муки и хлеба (белок – 18%, клейковина – 44,1%), а качество клейковины у этой линии в среднем за годы изучения было на уровне сильных пшениц (75 ед. ИДК 3).

Включение линии GEN2021-512 в селекционно-генетические исследования в условиях Нижневолжского сельскохозяйственного региона России позволит использовать потенциал этой линии для улучшения сортов яровой мягкой пшеницы.

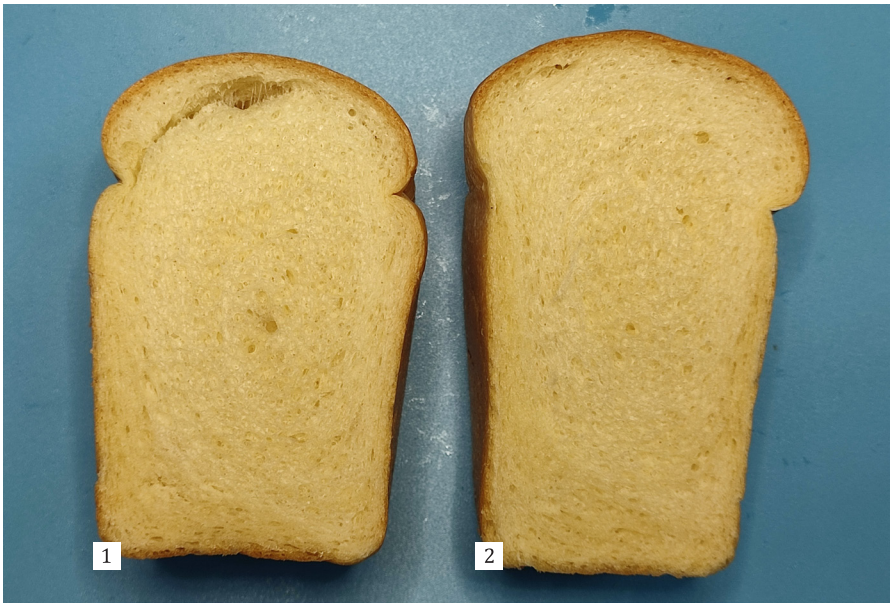


Рис. 3. **Хлебец: 1 – сорт яровой мягкой пшеницы ‘Добрыня’; 2 – линия GEN2021-512**

Fig. 3. **Experimental small loaf: 1 – spring bread wheat cv. ‘Dobrynya’; 2 – the GEN2021-512 line**

References / Литература

Badaeva E.D., Keilwagen J., Knüpffer H., Waßermann L., Dedkova O.S., Mitrofanova O.P. et al. Chromosomal passports provide new insights into diffusion of emmer wheat. *PloS One*. 2015;10(5):e0128556. DOI: 10.1371/journal.pone.0128556

Barsukova V.S. Wheat's potential for resistance to heavy metals (Potentsial pshenitsy po ustoychivosti k tyazhelym metallam) [dissertation]. Novosibirsk; 1993. [in Russian] (Барсукова В.С. Потенциал пшеницы по устойчивости к тяжелым металлам: дис. ... канд. биол. наук. Новосибирск; 1993).

Belyanchikova Yu.V. Wheat striped mosaic virus, its properties and distribution (Virus polosatoy mozaiki pshenitsy, yego svoystva i rasprostraneniye) [dissertation]. Moscow: All-Union Research Institute of Phytopathology; 1969. [in Russian] (Белянчикова Ю.В. Вирус полосатой мозаики пшеницы, его свойства и распространение: дис. ... канд. биол. наук. Москва, ВНИИ фитопатологии; 1969).

Chelak V.R. Phylogeny of the Ispahan emmer wheat *T. ispahanicum* Heslot. *Cytology and Genetics*. 1978;12(4):322-330. [in Russian] (Челак В.Р. Филогенетика исфаханской полбы – *T. ispahanicum* Heslot. *Цитология и генетика*. 1978;12(4):322-330).

Chen Y., Liu Y., Zhang J., Torrance A., Watanabe N., Adamski N. et al. The *Triticum ispahanicum* elongated glume locus P2 maps to chromosome 6A and is associated with the ectopic expression of SVP-A1. *Theoretical and Applied Genetics*. 2022;135(7):2313-2331. DOI: 10.1007/s00122-022-04114-y

Dorofeev V.F., Filatenko A.A., Migushova E.F., Udachin R.A., Yakubtsiner M.M. Flora of cultivated plants. Vol. 1. Wheat. D.D. Brezhnev (ed.). Leningrad: Kolos; 1979. [in Russian] (Дорофеев В.Ф., Филатенко А.А., Мигушова Э.Ф., Удачин Р.А., Якубцинер М.М. Культурная флора СССР. Т. 1. Пшеница / под ред. Д.Д. Брежнева. Ленинград: Колос; 1979).

Dorofeev V.F., Udachin R.A., Semenova L.V., Novikova M.V., Gradchaninova O.D., Shitova I.P., Merezhko A.F., Filatenko A.A. Wheats of the world: species composition, breeding achievements, modern problems, and source material (Pshenitsy mira: vidovoy sostav, dostizheniya selektsii, sovremennye problemy i iskhodny material). V.F. Dorofeev (ed.). 2nd ed. Leningrad: Agropromizdat; 1987. [in Russian] (Дорофеев В.Ф., Удачин Р.А., Семенова Л.В., Новикова М.В., Градчанинова О.Д., Шитова И.П., Мережко А.Ф., Филатенко А.А. Пшеницы мира: видовой состав, достижения селекции, современные проблемы и исходный материал / под ред. В.Ф. Дорофеева. 2-е изд. Ленинград: Агропромиздат; 1987).

Fedin M.A. (ed.). Methodology for state crop variety trials. First issue. General provisions (Metodika gosudarstvennogo sortoispytaniya selskokhozyaystvennykh kultur. Vypusk pervy. Obshchaya chast). Moscow: State Commission for Crop Variety Trials; 1989. [in Russian] (Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Выпуск первый. Общая часть / под ред. М.А. Федина. Москва: Госкомиссия по сортоиспытанию сельскохозяйственных культур; 1989).

Grigorieva O.G. Resistance of various wheat and *Aegilops* taxa to rust pathogens (Ustoychivost razlichnykh taksonov pshenitsy i egilopsa k vozbuditelyam rzhavchiny) [dissertation]. Leningrad: VIR; 1975. [in Russian] (Григорьева О.Г. Устойчивость различных таксонов пшеницы и эгилопса к возбудителям ржавчины: дис. ... канд. биол. наук. Ленинград: ВИР; 1975).

Guidelines for trials for distinctness, uniformity, and stability: [website]. [in Russian] (Методики испытаний на ООС (однородность, отличимость, стабильность): [сайт]). URL: https://gossortrf.ru/publication/metodiki-ispytaniy-na-oos.php [дата обращения: 05.12.2024].

Gultyaeva E.I. Methods for the identification of genes for resistance of wheat to leaf rust using DNA markers and characteristics of effective *Lr* genes (Metody identifikatsii genov ustoychivosti pshenitsy k buroy rzhavchine s ispolzovaniyem DNK-markerov i kharakteristika effektivnosti Lr-genov). St. Petersburg: VIZR; 2012. [in Russian] (Гультяева Е.И. Методы идентификации генов устойчивости пшеницы к бурой ржавчине с использованием ДНК-маркеров и характеристика эффективности *Lr*-генов. Санкт-Петербург: ВИЗР; 2012).

Gultyaeva E.I., Sibikeev S.N., Druzhin A.E., Shaydayuk E.L. Enlargement of genetic diversity of spring bread wheat resistance to leaf rust (*Puccinia triticina* Eriks.) in Lower Volga region. *Agricultural Biology*. 2020;55(1):27-44. DOI: 10.15389/agrobiology.2020.1.27eng

Khoshbakht K. Esfahanian emmer (*Triticum ispahanicum* Heslot) – a case of an extinct on-farm crop. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics*. 2009: Suppl 92:189-195.

Kihara H., Yamashita K., Tanaka M. Morphological, physiological, genetic and cytological studies in *Aegilops* and *Triticum* collected from Pakistan, Afghanistan and Iran. In: K. Yamashita (ed.). *Results of the Kyoto University Scientific Expedition to the Karakoram and Hindukush*. Kyoto: Kyoto University; 1965. p.1-118.

Kuckuck H. Report to the Government of Iran on the distribution and variation of cereals in Iran (including their related wild species). Rome: Food and Agricultural Organization of the United Nations. Report number: 517; 1956.

Mac Key J. Species relationship in *Triticum*. In: J. Mac Key (ed.). *Proceedings of the Second International Wheat Genetics Symposium*. Lund: Hereditas; 1966. p.237-276.

Mains E.B., Dietz S.M. Physiologic forms of barley mildew *Erysiphe graminis hordei*. *Phytopathology*. 1930;20(3):229-239.

Mains E.B., Jackson H.S. Physiologic specialization in the leaf rust of wheat *Puccinia triticina* Erikss. *Phytopathology*. 1926;16(2):89-120.

McIntosh R.A. Catalogue of Gene Symbols for Wheat, 2024 edition: [website]. Available from: https://wheat.pw.usda.gov/GG3/Wheat_Gene_Catalog_Documents [accessed Apr. 10, 2025].

Merezhko A.F., Udachin R.A., Zuev E.V., Filatenko A.A. Serbin A.A., Lyapunova O.A., Kosov V.Yu., Kurkiev U.K., Okhotnikova T.V., Navruzbekov N.A., Boguslavskiy R.L., Abdulaeva A.K., Chikida N.N., Mitrofanova O.P., Potokina S.A. Replenishment, preservation in living form and study of the world collection of wheat, Aegilops and triticale: guidelines (Popolneniye, sokhraneniye v zhivom vide i izucheniye mirovoy kollektsii pshenitsy, egilopsa i triticale: metodicheskiye ukazaniya). A.F. Merezhko (ed.). St. Petersburg: VIR; 1999. [in Russian] (Мережко А.Ф., Удачин Р.А., Зуев Е.В., Филатенко А.А., Сербин А.А., Ляпунова О.А., Косов В.Ю., Куркиев У.К., Охотникова Т.В., Наврузбеков Н.А., Богуславский Р.Л., Абдулаева А.К., Чикида Н.Н., Митрофанова О.П., Потокина С.А. Пополнение, сохранение в живом виде и изучение мировой коллекции пшеницы, эгилопса и тритикале: методические указания / под ред. А.Ф. Мережко. Санкт-Петербург: ВИР; 1999).

Migushova E.F., Zhukovsky P.M. Towards the knowledge of wheat *T. ispahanicum* Heslot. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 1969;39(3):71-90. [in Russian] (Мигушова Э.Ф., Жуковский П.М. К познанию пшеницы *T. ispahanicum* Heslot. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1969;39(3):71-90).

Miller T.E. Systematics and evolution. In: F.G.H. Lupton (ed.). *Wheat Breeding*. Dordrecht: Springer; 1987. p.1-30. DOI: 10.1007/978-94-009-3131-2_1

Murashev V.V., Morozova Z.A. Morphogenesis and structural organization of Isfahan wheat – *Triticum ispahanicum* Heslot; 2n = 28, the A^uB genomes. *Science Almanac*. 2018;4-3(42):172-180. [in Russian] (Мурашев В.В., Морозова З.А. Морфогенез и структурная организация пшеницы исфаханской – *Triticum ispahanicum* Heslot; геном A^uB; 2n = 28. *Научный альманах*. 2018;4-3(42):172-180). DOI: 10.17117/na.2018.04.03.172

Pausheva Z.P. Workshop on plant cytology (Praktikum po tsitologii rasteniy). 4th ed. Moscow: Agropromizdat; 1988. [in Russian] (Паушева З.П. Практикум по цитологии растений. 4-е изд. Москва: Агропромиздат; 1988).

Prins R., Marais G.F., Marais A.S., Janse B.J., Pretorius Z.A. A physical map of the *Thinopyrum*-derived *Lr19* translocation. *Genome*. 1996;39(5):96-126. DOI: 10.1139/g96-126

Roelfs A.P., Singh R.P., Saari E.E. Rust diseases of wheat: concepts and methods of disease management. Mexico: CIMMYT; 1992. Available from: https://repository.cimmyt.org/entities/publication/e8a64950-5c39-4df2-b292-1ee1bfa5aa91 [accessed Jan. 20, 2025].

Shaimyardyanov N.A. Resistance of wheat species to *Septoria nodorum* Berk. (Ustoychivost vidov pshenitsy k *Septoria nodorum* Berk.). *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 1989;(6):188-192. [in Russian] (Шаймярдянов Н.А. Устойчивость видов пшеницы к *Septoria nodorum* Berk. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 1989;(6):188-192).

Watanabe N., Sekiya T., Sugiyama K., Yamagishi Y., Imamura I. Telosomic mapping of the homoeologous genes for the long glume phenotype in tetraploid wheat. *Euphytica*. 2002;128:129-134. DOI: 10.1023/a:1020633904782

Zhou Y., Zhao X., Li Y., Xu J., Bi A., Kang L. et al. *Triticum* population sequencing provides insights into wheat adaptation. *Nature Genetics*. 2020;52(12):1412-1422. DOI: 10.1038/s41588-020-00722-w

Zhukovsky P.M., Migushova E.F. The most highly immune endemic gene pool for breeding resistant wheat cultivars through remote hybridization (Naiboleye vysokoimmunny endemichny genofond dlya vyvedeniya ustoychivykh sortov pshenitsy putem otdalennoy gibridizatsii). *Vestnik selskokhozyaystvennoy nauki = Agricultural Science Bulletin*. 1969;(2):9-20. [in Russian] (Жуковский П.М., Мигушова Э.Ф. Наиболее высокоиммунный эндемичный генофонд для выведения устойчивых сортов пшеницы путем отдаленной гибридизации. *Вестник сельскохозяйственной науки*. 1969;(2):9-20).

Информация об авторах

Александр Евгеньевич Дружин, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, alex_druzhin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3968-2470

Сергей Николаевич Сибикеев, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, sibikeev_sergey@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8324-9765

Елена Ивановна Гультяева, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, 196608 Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, ш. Подбельского, 3, gullena@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0001-7948-0307

Зульфия Ерназаровна Фитилева, младший научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, Zulya0305@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-6751-3789

Любовь Владимировна Андреева, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, l.v.andreeva_75@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3631-1084

Information about the authors

Alexander E. Druzhin, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, alex_druzhin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3968-2470

Sergey N. Sibikeev, Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, sibikeev_sergey@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8324-9765

Elena I. Gultyaeva, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, All-Russian Research Institute of Plant Protection, 3 Podbelskogo Hwy., Pushkin, St. Petersburg 196608, Russia, gullena@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0001-7948-0307

Zulfiya E. Fitileva, Associate Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, Zulya0305@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-6751-3789

Lubov V. Andreeva, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, l.v.andreeva_75@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3631-1084

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 20.01.2025; одобрена после рецензирования 04.07.2025; принята к публикации 11.08.2025.
The article was submitted on 20.01.2025; approved after reviewing on 04.07.2025; accepted for publication on 11.08.2025.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ПРОБЛЕМ

Научная статья
УДК 634.13:631.525.32:577.21(475)
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-231-244

CC BY

Систематизация национальной коллекции груши с использованием набора SSR-маркеров, рекомендованного ECPGR

Т. Н. Марцинкевич, О. А. Якимович, Ю. Г. Кондратенок, Н. В. Кухарчик, А. Н. Рымко[2]

[1] *Институт плодоводства, Самохваловичи, Беларусь*

[2] *Общество с ограниченной ответственностью «АртБиоТех», Минск, Беларусь*

Автор, ответственный за переписку: Татьяна Николаевна Марцинкевич, 87martany@gmail.com

Актуальность. Содержание коллекций плодовых культур надлежащим образом предполагает использование значительных материальных ресурсов. Одна из важнейших задач – нахождение и удаление дублирующих образцов. Целью данной работы являлась оценка коллекционных образцов груши на предмет уникальности или тождественности тому или иному генотипу, а также оценка работоспособности маркерной системы, рекомендованной ECPGR.
Материалы и методы. Объектом исследования были девять образцов груши, полученные из экспедиций по Республике Беларусь, и пять сортов-контролей из селекционных станций и научно-исследовательских институтов. Идентификация данных объектов проведена методом SSR-анализа с использованием 12 маркеров.
Результаты. Установлена принадлежность ряда образцов коллекции груши Института плодоводства, поступивших из разных источников, к сортам 'Талгарская Красавица', 'Clapp Favorite', 'Doyenné du Comice' и 'Vasarine Sviestine' и определена уникальность сортов 'Подарок Краснокутский' и 'Семеновская'. При проведении молекулярно-генетического анализа приоритетные маркеры EMPc117, EMPc11, CH04e03, CH01f07a, CH01d08, CH01d09, GD147, CH05c06 и CH03d12 показали высокую эффективность. Уровень аллельного полиморфизма (*He*) варьировал в пределах от 0,52 до 0,89, в среднем это составило 0,77 единиц. Значение информативных аллелей – 5,44, общее число выявленных – 96, со средним значением на маркер – 8. Рассчитанные параметры по данным маркерам у изученных сортов согласуются с результатами анализа других авторов из Швеции, Германии, Англии, что крайне важно при сравнении коллекций растений из различных баз данных.

Ключевые слова: груша, сорт, идентификация, SSR-маркирование, кластерный анализ, Беларусь

Благодарности: работа выполнена в рамках Государственной программы «Научно-инновационная деятельность Национальной академии наук Беларуси» на 2021–2025 гг., подпрограммы 03 «Изучение, идентификация и рациональное использование коллекций генетических ресурсов растений».
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Марцинкевич Т.Н., Якимович О.А., Кондратенок Ю.Г., Кухарчик Н.В., Рымко А.Н. Систематизация национальной коллекции груши с использованием набора SSR-маркеров, рекомендованного ECPGR. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(3):231-244. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-231-244

© Марцинкевич Т.Н., Якимович О.А., Кондратенок Ю.Г., Кухарчик Н.В., Рымко А.Н., 2025

IDENTIFICATION OF THE DIVERSITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES FOR SOLVING FUNDAMENTAL AND APPLIED PROBLEMS

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-231-244

Using a set of SSR markers chosen by the ECPGR to systematize the national pear collection

Tatsiana M. Martsynkevich[1], Volha A. Yakimovich[1], Julia G. Kandratsenak[1], Natallia V. Kukharchyk[1], Aliaksandr M. Rymko[2]

[1] *Institute for Fruit Growing, Samokhvalovichi, Belarus*

[2] *ArtBioTech Limited Liability Company, Minsk, Belarus*

Corresponding author: Tatsiana M. Martsynkevich, 87martany@gmail.com

Background. According to international requirements, maintenance of a fruit crop collection involves the use of significant material resources. One of the most important tasks is to prevent duplicate samples from entering the collection. The genetic uniqueness and identity of pear accessions preserved at the Institute for Fruit Growing were studied with SSR markers recommended by the ECPGR.
Materials and methods. The material of the study included 9 pear accessions obtained from expeditions in the Republic of Belarus and 5 control cultivars from breeding stations and research institutes. Their identification was carried out with the SSR analysis method, using 12 markers.
Results. This analysis ascertained that a number of accessions received from other institutions and from amateurs, with different names, were in fact cvs. 'Talgarskaya Krasavitsa', 'Clapp Favorite', 'Doyenné du Comice', and 'Vasarine Sviestine'. Besides, the uniqueness was proved for cvs. 'Podarok Krasnokutsky' and 'Semenovskaya'. Priority markers (EMPc117, EMPc11, CH04e03, CH01f07a, CH01d08, CH01d09, GD147, CH05c06 and CH03d12) showed a high level of efficiency during the molecular genetic analysis. As a result, a total of 96 alleles were identified with the mean number of 8.0 alleles per marker; the mean number of informative alleles was 5.44. Based on the results obtained by mathematical calculations (*He*, *EMR*, and *MI*), the EMPc117 primer was found to be more effective. The *He* for the 12 SSR primers varied between 0,52–0,89, averaging 0,77 units. The calculated parameters for these markers in the studied cultivars were found to be consistent with the analysis results of other authors from Sweden, Germany, and England, which is extremely important when comparing plant collections from different databases.

Keywords: pear, cultivar, identification, SSR markers, cluster analysis, Belarus

Acknowledgements: the work was carried out within the framework of the State Program "Scientific and Innovative Activities of the National Academy of Sciences of Belarus" for 2021–2025, subprogram 03 "Study, Identification and Rational Use of Collections of Plant Genetic Resources".
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Martsynkevich T.M., Yakimovich V.A., Kandratsenak Yu.G., Kukharchyk N.V., Rymko A.M. Using a set of SSR markers chosen by the ECPGR to systematize the national pear collection. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(3):231-244. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-231-244

Введение

Генетические ресурсы в странах-держателях являются основным источником качественного исходного материала для создания высокопродуктивных сортов, способных успешно противостоять меняющимся условиям (изменение климата, распространение новых болезней и вредителей) и в то же время соответствовать ожиданиям потребителей.

Коллекция плодовых, ягодных, орехоплодных культур и винограда Института плодоводства является крупнейшей в Республике Беларусь и признана объектом Национального достояния. В настоящее время общий генофонд насчитывает пять с половиной тысяч образцов, из них порядка семисот сортов груши (Kazlouskaya, Yakimovich, 2019).

Пополнение генетических ресурсов в нашей стране, как и во многих других, тесно связано с проблемой дублирования образцов и неправильных названий, возникающей по разным причинам (Sehic et al., 2012). В Беларуси это связано с тем, что коллекции частично пополняются образцами с неизвестными или ошибочными названиями от садоводов-любителей, по результатам экспедиционных обследований. В Боснии и Герцеговине эта проблема существует из-за частой миграции населения Балканского полуострова на протяжении всей истории, которые сопровождались перемещением генетических ресурсов, часто с измененными названиями отдельных сортов (Đurić et al., 2009; Zeljković et al., 2019). Результатом такого положения дел является неэффективная гибридизация, пустая трата ресурсов и в целом снижение уровня генетического разнообразия.

Для исключения проблемы дублирования и содержания коллекции надлежащим образом, включая качественное обследование, инвентаризацию, ведение документации согласно международным требованиям, информирование общественности, необходимо использовать наиболее объективные методы изучения коллекционного материала. В прошлом эту роль выполняли морфологические методы, сейчас незаменимым инструментом в выполнении поставленных задач являются методы молекулярной генетики, а именно использование молекулярных маркеров (De Andres et al., 2007; Nybom, Weising, 2010).

Внедрение молекулярных маркеров позволило сделать определение свойств генофонда более целенаправленным, менее зависимым от окружающей среды и более информативным. Молекулярные исследования позволяют изучать эволюцию, происхождение, плоидность различных видов и культурных сортов, оценивать генетическое разнообразие и понимать происхождение местного и интродуцированного сортимента плодовых (Nadeem et al., 2018).

Одними из наиболее распространенных и популярных молекулярных маркеров при оценке генетических ресурсов являются простые повторы последовательностей (SSR) благодаря многим ценным свойствам – высокой частоте мутаций, локусоспецифичности, высокому полиморфизму и воспроизводимости; они многоаллельны и используются для анализа родственных таксонов (Yamamoto et al., 2002; Taheri et al., 2018).

Молекулярные исследования для оценки генетического разнообразия генофонда груши проводились во многих странах мира: Беларуси (Urbanovich et al., 2011), Боснии и Герцеговине (Gasi et al., 2013; Zeljković et al., 2021), Грузии (Asanidze et al., 2014), Германии (Reim et al., 2016), Италии (Ferradini et al., 2017), Японии (Nishio et al., 2016), Польше (Wolko et al., 2014), Португалии (Kocsisné et al., 2020), Испании (Alonso Segura et al., 2021) и Тунисе (Ouni et al., 2020). Основной тематикой данных исследований было изучение местных сортов, сравнение диких родственников, перспективных сортов и других видов *Pyrus* L., а также изучение проблем, связанных с биологическим разнообразием каждой страны.

Общий набор SSR-маркеров, определенный Европейской программой сотрудничества в области генетических ресурсов растений (ECPGR) для скрининга сортов груши (Evans et al., 2009; Sehic et al., 2012), дает возможность сравнить полученные генетические профили сортообразцов с аналогичными, полученными в лабораториях других стран, и обусловил их выбор для нашего исследования, *целью* которого являлась оценка коллекционных образцов груши на предмет уникальности или тождественности, а также оценка работоспособности данной маркерной системы.

Материалы и методы

Объектом для ДНК-маркирования были 9 образцов груши, полученные из экспедиций по Республике Беларусь (Kazlouskaya et al., 2021), контролями выбрали пять сортов из селекционных станций и научно-исследовательских институтов. Данные об источнике получения образцов представлены в таблице 1.

ДНК экстрагировали из свежих молодых листьев (навеска 100 мг). Растительный материал замораживали в жидком азоте, гомогенизировали и выделяли ДНК с помощью набора Genomic DNA Purification Kit (Fermentas) согласно рекомендованному производителем протоколу. Качество и концентрацию ДНК определяли методом электрофореза в 1,5-процентном агарозном геле путем сравнения со стандартами с известной концентрацией (50 ng, 100 ng, 200 ng, 400 ng). Фиксацию результатов проводили с помощью системы Imagine ChemiDocXRS (Bio-Rad Laboratories, США). Детекция результатов экстракции показывала высокое содержание ДНК в пробах.

В работе использовано 12 микросателлитных маркеров, сгруппированных в пять мультиплексных наборов, содержащих по 2 или 3 маркера. В каждом наборе SSR-маркеры были сгруппированы с учетом диапазона размеров амплифицированных фрагментов и имели разные флуоресцентные метки (By5, By5,5): 1-й набор: A(CH01c06), B(CH02c02b); 2-й набор: E(CH03d12), F(SdSSR); 3-й набор: G(CH05c06), H(EMPc11); 4-й набор: J(EMPc117), K(CH01d09), L(CH04e03); 5-й набор: M(GD147), N(CH01f07a), O(CH01d08). Восемь из числа исследуемых маркеров взяты нами из набора приоритетных (ECPGR) и 4 SSR маркера – из числа рекомендованных белорусскими исследователями для сортов и гибридов груши (Urbanovich et al., 2011).

Последовательности праймеров для молекулярных маркеров, использованных в нашем исследовании, приведены в таблице 2.

Для проведения реакции амплификации каждый образец брали в концентрации 50 ng/µl. Реакционная смесь объемом 25 µl содержала готовый премикс 2x ArtMix Color – 12,5 µl, 1 µl праймера (10 pmol/µl), ДНК (50 ng/µl) – 2,5 µl. Условия проведения амплификации: начальная денатурация при 95°C в течение 2 мин, затем 45 циклов: 95°C в течение 5 с, температура отжига в зависимости отиспользуемого праймера – 10 с, синтез при 72°C в течение 10 с. Реакция проводилась в термоциклере C 1000

Таблица 1. Объекты исследования
Table 1. Objects of research

Сорт, образец / Cultivar or accession	Год поступления в коллекцию / Year of entering the collection	Источник получения образца / Pear germplasm supplier
Контрольные сорта / Control cultivars		
‘Деканка дю Комис’ (‘Doyenne du Comice’)	1959	Майкопская опытная станция – филиал ВИР (Россия, Республика Адыгея, Майкоп)
‘Любимица Клаппа’ (‘Clapp Favorite’)	1949	Донецкая опытно-селекционная станция, сейчас Артемовский научно-исследовательский центр Института садоводства УААН (Украина, Артемовск)
‘Маслянистая Летняя’ (‘Vasarine Sviestine’)	1965 1997	Витенская плодовоовощная опытная станция (Vytėnų bandymų stotis), сейчас НИИ плодоовощеводства, (Sodininkystės irdaržininkystės institutą) (Литва, Бабтай); повторно из Pûre Horticultural Research Centre (Pûre HRC) (Латвия, Пуре)
‘Подарок Краснокутский’	1984	Гродненский зональный институт растениеводства НАН Беларуси (Беларусь, Щучин)
‘Талгарская Красавица’	1997	Pûre Horticultural Research Centre (Pûre HRC) (Латвия, Пуре).
Исследуемые образцы / Studied accessions		
Адампаль	2017	Ситник В. И., Гродненская обл.
Бере Слуцкая	2018	Ушаков, Минская обл., Копыль
Груша Авдитовского	2017	Авдитовский, Гродненская обл.
Груша Шумского	2017	Шумский И. П., Могилевская обл., Елизово
Анджелейс	2014	Конюшик А. И., Брест
Марианна	2013	Гомельская обл.
Нагима	2018	Казахский НИИ плодоводства и виноградарства, Казахстан, Алматы
Семеновская	2014	Семенова З. А. Минский р-н., Самохваловичи
Эйсманты	2017	Гродненская обл., Эйсманты

Touch CFX96 (Applied Biosystems, USA). Продукты амплификации разделяли в 1,5-процентном агарозном геле в трис-ацетатном буфере. Фрагментный анализ проводили на генетическом анализаторе GenomeLab GEXP – Beckman Coulter (США) согласно рекомендациям фирмы-производителя. Данные обрабатывали в программе GeneMarker V.2.7.4.

Для оценки изменчивости изучаемых локусов и генетического разнообразия генотипов груши провели статистический анализ ряда параметров, в их числе: количество выявленных аллелей (number of detected alleles, *Na*), наблюдаемая гетерозиготность (observed heterozygosity, *Ho*), количество эффективных аллелей (number of effective alleles, *Ne*) и ожидаемая гетерозиготность (expected heterozygosity, *He*), рассчитываемые по опубликованным формулам (Nei, Roychoudhury, 1974) с помощью пакета программ Excel:

$He = 1 - \sum (p_i)^2$,

$Ne = 1/\sum (p_i)^2$,

где p_i – частота встречаемости i-ого аллеля.

Для анализа информативности маркерной системы в целом использовали эффективное мультиплексное отношение (effective multiplex ratio, *EMR*) и маркерный индекс (marker index, *MI*), рассчитывая данные величины для каждого праймера в отдельности.

После определения длины синтезированных фрагментов и числа аллелей в каждом локусе, выбрав бинарную нумерацию, наличие аллеля в образце отмечали «1», отсутствие – «0».

Оценка генетической близости образцов и построение дендрограммы проводились на основании индекса генетического сходства Жаккарда, кластерный анализ выполнен методом UPGMA – с использованием пакета программ MolMarker.

Результаты

В ходе исследования у 14 образцов груши с помощью набора SSR-маркеров идентифицировано 96 фрагментов, из них 67 (70%) – полиморфные, 29 – мономорфные

Таблица 2. **Сет праймеров, использованный для ДНК-идентификации сортов груши**
Table 2. **The set of primers used for DNA identification of pear cultivars**

№ / No.	Праймеры / Markers	Последовательность олигонуклеотидов (F+R) / Sequence of oligonucleotides (F+R)	Метка / Label	Размер аллелей в пн / Allele size, bp	Температура, °С / Tm, °С
A	CH01c06	5’-TTCCCCATCGATCTCTC-3’ 5’-AAACTGAAGCCATGAGGGC-3’	By5,5	150–166	47
B	CH02c02b	5’-TGCATGCATGGAAACGAC-3’ 5’-TGGAAAAAGTCACACTGCTCC-3’	By5	103–133	48
E	CH03d12	5’-GCCCAGAAGCAATAAGTAAACC-3’ 5’-ATTGCTCCATGCATAAAGGG-3’	By5,5	109–125	53
F	SdSSR	5’-GAATTCTCGTCCCTTCATCTC-3’ 5’-GTTCCTTAGCCTCCCATTCTG-3’	By5	159–211	52
G	CH05c06	5’-ATTGGAACTCTCCGTATTGTGC-3’ 5’-ATCAACAGTAGTGGTAGCCGGT-3’	By5	88–118	55
H	EMPc11	5’-GCGATTAAAGATCAATAAACCCATA-3’ 5’-AAGCAGCTGGTTGGTGAAAT-3’	By5,5	140–55	51
J	EMPc117	5’-GTTCTATCTACCAAGCCACGCT-3’ 5’-CGTTTGTGTGTTTTACGTGTTG-3’	By5	99–119	53
K	CH01d09	5’-GCCATCTGAACAGAATGTGC-3’ 5’-CCCTTCATTCACATTTCCAG-3’	By5,5	133–156	51
L	CH04e03	5’-TTGAAGATGTTTGGCTGTGC-3’ 5’-TGCATGTCTGTCTCCTCCAT-3’	By5	179–205	45
M	GD147	5’-TCCCGCCATTTCTCTGC-3’ 5’-AAACCGCTGCTGCTGAAC-3’	By5	118–124	55
N	CH01f07a	5’-CCCTACACAGTTTCTCAACCC-3’ 5’-CGTTTTTGGAGCGTAGGAAC-3’	By5,5	177–195	55
O	CH01d08	5’-CTCCGCCGCTATAACACTTC-3’ 5’-TACTCTGGAGGGTATGTCAAAG-3’	By5	278–283	55

(30%). Количество выявленных аллелей (*Na*) на маркер колебалось от 3 до 12. В среднем одним маркером синтезировалось 8 фрагментов. Число фрагментов в одном локусе составляло 1–2, длина полученных фрагментов менялась в пределах 90–280 нуклеотидных пар. Наибольшее количество ампликонов получено с помощью маркеров CH02c02b, CH03d12, EMPc117, минимальное количество – маркерами CH04e03, CH01D08 (табл. 3).

По данным таблицы 3, самый высокий уровень аллельного полиморфизма (*He*) наблюдался в локусах CH03d12 и EMPc117 и составил 0,89. Наименьшее значение полиморфизма отмечено для маркеров CH04e03, GD147 – 0,52 и CH01D08 – 0,64. Эффективное число аллелей (*Ne*) было максимальным в этих же локусах CH03d12, EMPc117 и минимальным в CH04e03, GD147. Так как данные величины у рассмотренных локусов были пропорциональны, это доказало хорошую информативность маркеров и высокий уровень полиморфизма микросателлитных последовательностей в геноме груши.

Наблюдаемый уровень гетерозиготности (*Ho*) у исследуемых сортов груши характеризовался относительно высоким уровнем и варьировал от 0,14 до 1. Максимальное значение получено для локуса EMPc117 – 1. Минимальное – у CH04e03, GD147, CH01F07a. Но для локуса CH01D08 этот показатель имел нулевое значение, что отразилось на среднем значении *Ho* по всему набору и составило 0,29. Такое среднее показание наблюдаемого уровня гетерозиготности может быть связано с малой выборкой образцов или с наличием нулевых аллелей, которые возникают из-за мутаций на сайтах праймеров и, соответственно, не могут быть амплифицированы (нуль-аллели), что приводит к ложным гомозиготам (Galinskaya et al., 2019).

Маркерный индекс *MI* и эффект мультиплексного коэффициента *EMR* являются статистическими величинами, используемыми для оценки суммарной пригодности маркерной системы. И чем выше значения *MI* и *EMR* для методики, тем она лучше. Параметр *MI* менялся в пределах от 0,13–7,18, а *EMR* – в пределах 0,26–8,16, средние их показатели были соответственно 1,17 и 1,37. Максимальные значения *MI* и *EMR* отмечены у праймера EMPc117, минимальные – по маркерному индексу у GD147, по эффекту мультиплексного коэффициента у GD147 и CH04e03. В целом между количеством синтезируемых фрагментов (*Na*) и параметрами количества полиморфных фрагментов (*EMR*), (*MI*) наблюдалась положительная корреляция, что свидетельствовало о хорошей пригодности системы.

Таблица 3. Статистические параметры образцов груши, полученные SSR-маркерами
Table 3. Statistical parameters of pear accessions obtained with SSR markers

Параметры / Index Праймеры / Markers	*Na*	*Ne*	*Ho*	*He*	*EMR*	*MI*
CH01c06	7	4,38	0,28	0,78	0,88	0,68
CH02c02b	12	7,53	0,5	0,86	2,33	2,00
CH03d12	12	9,53	0,28	0,89	0,88	0,78
SdSSR	7	5,14	0,14	0,81	0,33	0,26
CH05c06	8	4,74	0,14	0,79	0,25	0,19
EMPc11	11	7,04	0,28	0,86	0,88	0,75
EMPc117	12	8,47	1	0,89	8,16	7,18
CH01d09	10	6,75	0,42	0,85	1,99	1,69
CH04e03	3	2,08	0,14	0,52	0,26	0,14
GD147	5	2,1	0,14	0,52	0,26	0,13
CH01F07a	6	4,79	0,14	0,79	0,28	0,20
CH01D08	3	2,78	0	0,64	0	0
Всего / Total	96	65,33	3,46	9,19	16,5	14,05
Среднее значение / Mean value	8,00	5,44	0,29	0,77	1,37	1,17

Примечание: *Na* – количество выявленных аллелей; *Ne* – эффективное число аллелей; *Ho* – наблюдаемая гетерозиготность; *EMR* – эффективное мультиплексное отношение; *MI* – маркерный индекс

Note: *Na* is the number of detected alleles; *Ne* is the number of effective alleles; *Ho* is the observed heterozygosity; *He* is the expected heterozygosity; *EMR* is the effective multiplex ratio; *MI* is the marker index

Рассчитанные параметры позволили сравнить полученные нами данные по нескольким общим маркерам (ECPGR) у изученных сортов с используемыми в других исследованиях авторами для анализа своих коллекций: из Швеции – J. Sehic с соавторами (Sehic et al., 2012); Англии – K. M. Evans с соавторами (Evans et al., 2009); Германии – H. Xuan с соавторами (Xuan et al., 2010).

Так, в исследованиях J. Sehic было 9 SSR-маркеров: EMPc117, EMPc11, CH04e03, CH01f07a, CH01d08, CH01d09, GD147, CH05c06 и CH03d12, которые рассматривались и в нашей работе. В статье (Sehic et al., 2012) для анализа выборки из 50 образцов по маркерам CH04e03 и CH01d08 выявлено 6 и 7 аллелей соответственно – это наименьшие значения из исследованных ими SSR-маркеров по шведской коллекции. В нашем исследовании по этим же локусам также отмечен наиболее низкий уровень полиморфизма, амплифицировалось только 3 аллеля. Маркеры EMPc117, CH01d09, CH01f07a и CH03d12, аналогично дававшие самые высокие значения – 12, 15, 14 и 9 аллелей на локус, показали идентично высокий результат и в нашей работе.

Таким образом, данный набор приоритетных маркеров ECPGR действительно дает возможность сопоставить результаты и, следовательно, объединить данные по коллекциям из разных регионов мира.

При проведении генотипирования оптимальное объединение SSR-маркеров в мультиплексных наборах позволило нам эффективно идентифицировать целевые фрагменты при выполнении фрагментного анализа; данные приведены в таблице 4. На рисунке 1 и 2 представлены в качестве примера аллельные профили образцов.

По результатам полученных данных SSR-генотипирования выполнен кластерный анализ и составлена дендрограмма (рис. 3).

Анализ полученной дендрограммы показал, что в выборке исследуемых образцов выделено 4 основных кластера. В первый кластер вошел контрольный сорт ‘Талгарская Красавица’ (рис. 4, I) и образец Нагима (рис. 4, II).

Сорт ‘Талгарская Красавица’ получен селекционером А. Н. Кацейко от свободного опыления бельгийского сорта ‘Лесная Красавица’ (‘Fondante des Bois’) (Katseyko, 1956). В коллекцию сорт поступил из Pûre Horticultural Research Centre (Pûre HRC) (Латвия, Пуре) в 1997 г. В Беларуси распространен также под названием «Алмаатинка».

Ранние исследования показали, что изучаемый сорт находится в одном кластере с американским сортом ‘Хони Дью’ (‘Honey Dew’) (Urbanovich et al., 2011), производным груши грушелистной с китайским ‘Пинго-ли’ (‘Pingo-li’), имеющим сложное гибридное происхождение между грушей яйцевидной и грушелистной. По морфоло-

Таблица 4. Микросателлитные ДНК-профили изучаемых сортов груши

Table 4. Microsatellite DNA profiles of the studied pear cultivars

Образец / Accession	Микросателлитные маркеры											
	CH01c06 A	CH02c02b B	CH03d12 E	SdSSR F	CH05c06 G	EMPc11 H	EMPc117 J	CH01d09 K	CH04e03 L	GD147 M	CH01f07a N	CH01d08 O
	Мультиплексные наборы											
	1		2		3		4			5		
Адамполь	152	133	115	–	87	148	86,111	133,140	182	122	184	–
Анджелейс	148,160	119	92,110	157	86,95	144,148	90,108	132,138	183	98,121	149,185	282
Бере Слуцкая	153	131	114	–	88	148	88,107	129,137	182	121	184	–
Груша Авдитовского	148	118,135	107	154	95	155	93,109	134	182	121	179	–
Груша Шумского	152	131	114	–	88	151	84,110	132,140	183	122	185	–
Деканка дю Комис	149,157	119	90,108	155	90,96	142,148	90,110	131,140	182	97,121	147,184	282
‘Любимица Клаппа’	148	118,134	108	154	95	152	90,108	134	182	123	180	–
Марианна	148	118,134	107	154	95	152	90,108	134	183	123	180	–
‘Маслянистая Летняя’	152	131	114	–	88	148	88,110	132,140	182	123	185	–
Нагима	148,156	109,127	123	175	92	154	96,107	125	182,186	122	180	279
‘Подарок Краснокутский’	157	114,132	95,113	158,161	86	112,117	–	–	–	127	184	285
Семеновская	157	117	110,128	155,182	95	143,153	–	–	–	–	–	–
‘Талгарская Красавица’	148,156	110,127	125	175	91	153	96,105	126	182,186	123	180	279
Эйсманты	148	117,135	107	154	95	152	90,108	134	182	121	179	–

Примечание: значение «–» – нет данных

Note: dash (–) means no data

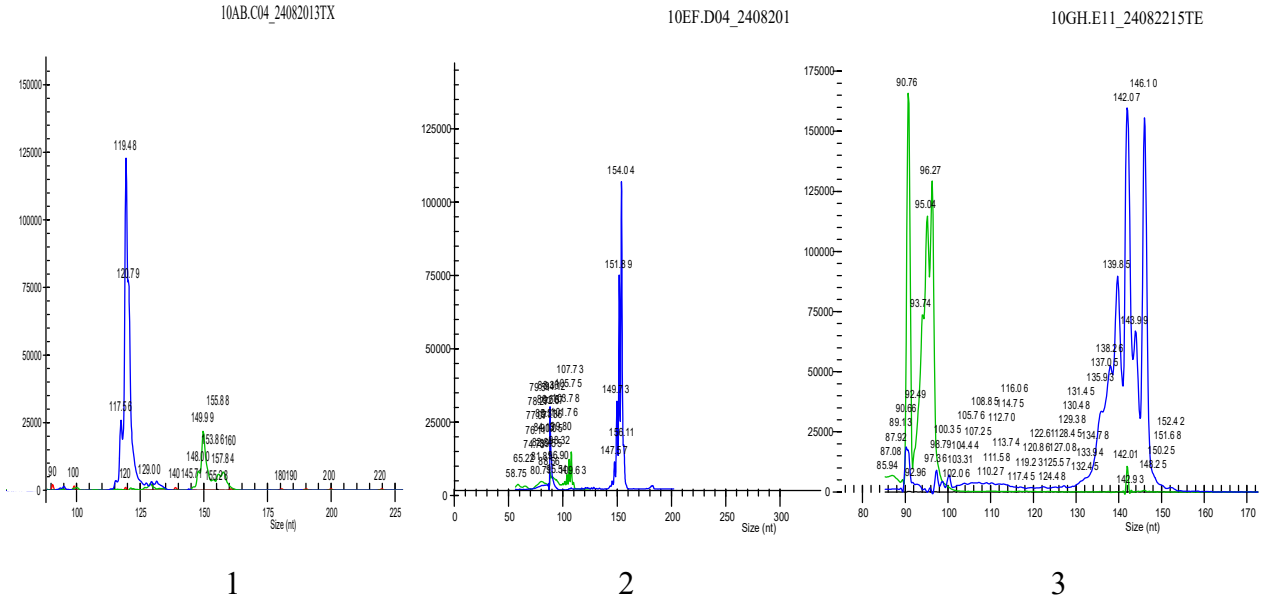


Рис. 1. **Аллельный профиль сорта *Doyenne du Comice***

Fig. 1. **Allele profile for the SSR marker set *Doyenne du Comice***

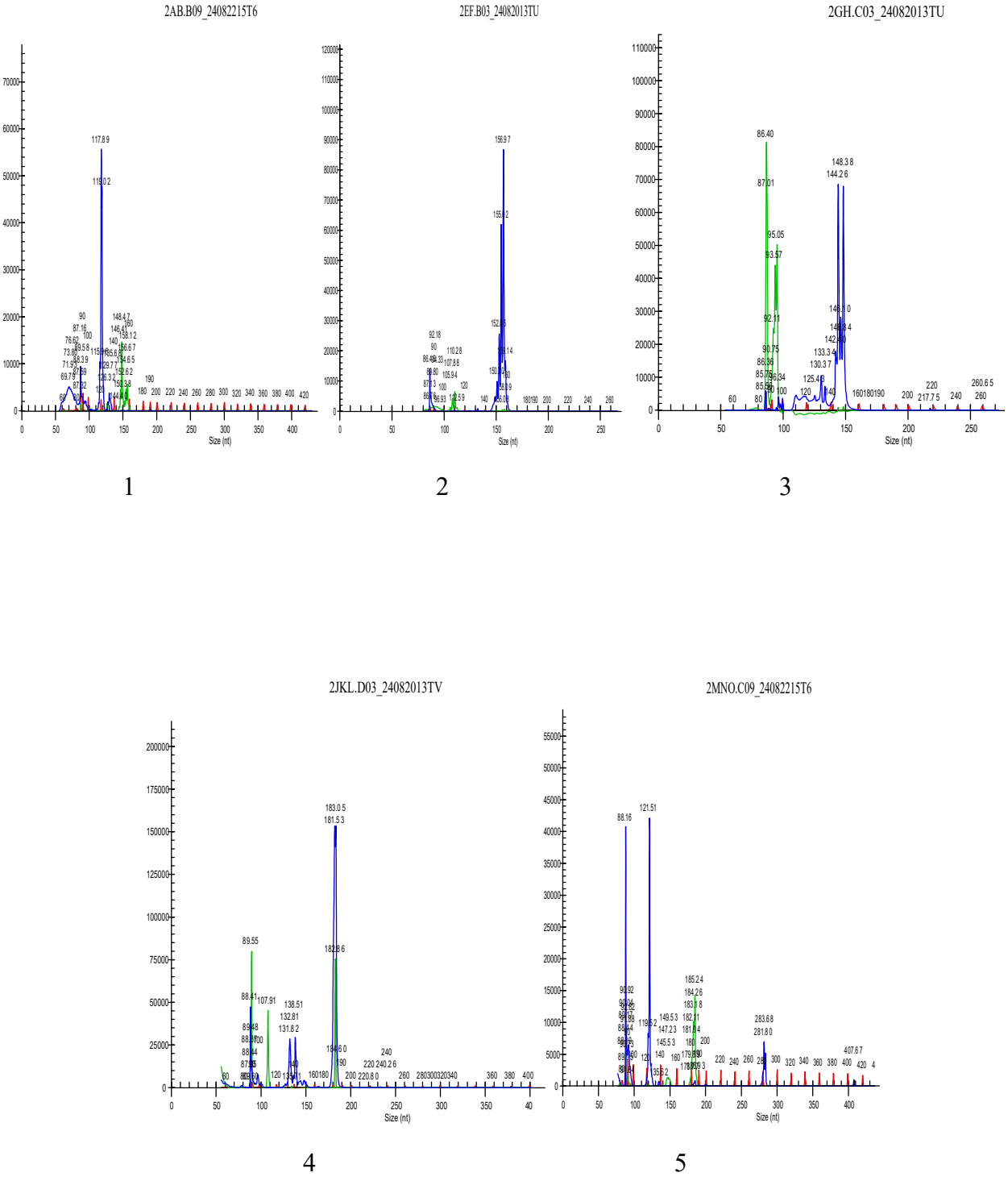


Рис. 2. Аллельный профиль образца *Angelys*
Fig. 2. Allele profile for the SSR marker set *Angelys*

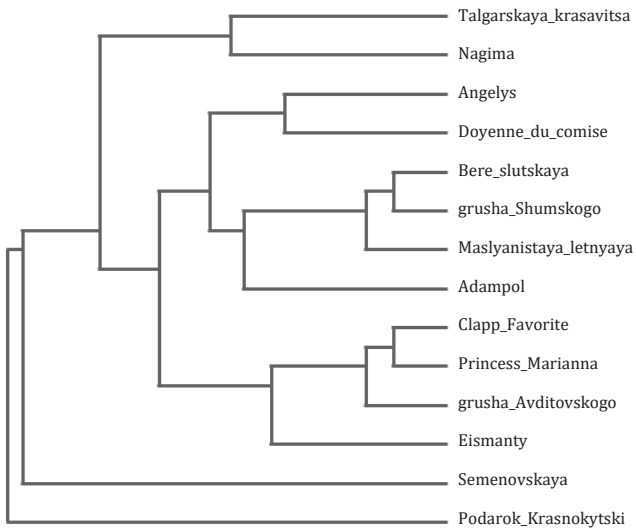
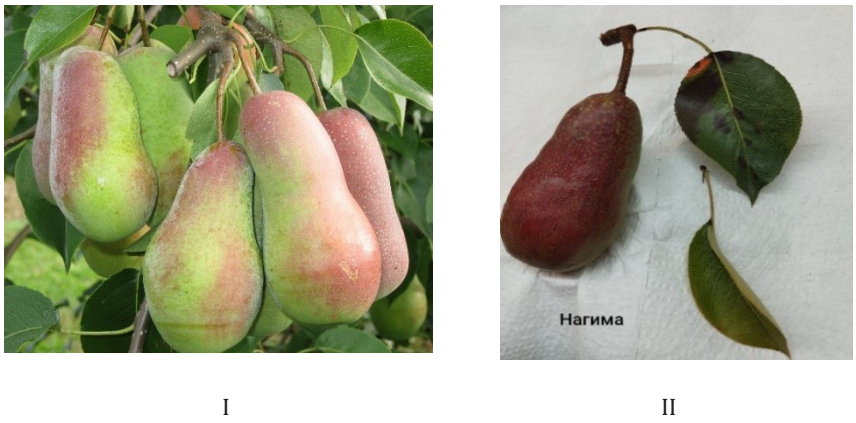


Рис. 3. Дендрограмма, показывающая генетическое родство между изученными образцами груши
Fig 3. Dendrogram showing the genetic relationship among the studied pear accessions



I II

Рис. 4. 'Талгарская красавица' (I) и Нагима (II) – 1-й кластер
Fig. 4. 'Talgarskaya Krasavitsa' (I), and Nagima (II): 1st cluster

гическим признакам листовой пластинки, характеристике плода (опадающая чашечка, плотная хрустящая мякоть плода) и генетическому анализу было доказано, что сорт 'Талгарская Красавица' по своему происхождению принадлежит к груше грушелистной, или песчаной (*Pyrus pyrifolia* (Burm.) Nakai) (Martsynkevich et al., 2017; Yakimovich, 2019).

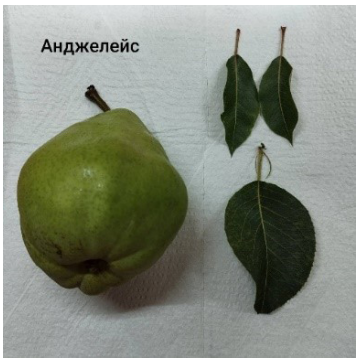
Образец под названием «Нагима» поступил в коллекцию в 2018 г. из Казахского научно-исследовательского института плодоводства и виноградарства. Информации о его происхождении нет. По результатам наших наблюдений по мере вступления дерева в плодоношение установлено, что морфологическое описание плодов данного образца соответствовало сорту 'Талгарская Красавица', но образец отличался более продолжительным периодом созревания (плоды сохраняли свои вкусовые качества до февраля), в то время как контрольный образец хранился до декабря, что обусловило необходимость более точной идентификации. Проведенный молекулярно-генетический анализ показал, что данные образцы груши имеют идентичные ДНК-профили по составу SSR-аллелей, то есть 'Талгарская Красавица' и Нагима из нашей коллекции – один и тот же сорт, либо Нагима является клоном 'Талгарской Красавицы' (см. табл. 4).

Второй кластер составили сорт 'Деканка дю Комис' (рис. 5, I) и образец Анджелейс (рис. 5, II).

Сорт груши 'Деканка дю Комис' ('Doyenné du Comice', 'Деканка Общественная') получен в середине XIX века в г. Анже (Франция), в саду местного общества садоводов (Comice Horticole) из смешанного посева семян разных сортов. Сорт быстро распространился по всей Франции, завезен в Америку, позже появился в Англии, Германии и на Украине (Simirenko, 1972).

Образец, поступивший от любителя в коллекцию под названием «Анджелейс», не соответствовал литературному описанию оригинального сорта. По нашим наблюдениям, он обладал схожими морфологическими признаками с 'Деканкой дю Комис'. В результате молекулярно-генетического анализа установлено их полное генетическое сходство.

По данным дендрограммы (см. рис. 3), третий кластер составили сорт 'Маслянистая Летняя' (контрольный сорт) (рис. 6, I) и образцы Адампаль (рис. 6, II), Груша Шумского (рис. 6, III), Бере Слуцкая (рис. 6, IV).



I II

Рис. 5. ‘Деканка дю Комис’ (I) и Анджелейс (II) – 2-й кластер
Fig. 5. ‘Doyenné du Comice’ (I), and Angelys (II): 2nd cluster

I II III IV

Рис. 6. ‘Маслянистая Летняя’ (I), Адампаль (II), Груша Шумского (III) и Бере Слуцкая (IV) – 3-й кластер
Fig. 6. ‘Vasarine Sviestine’ (I), Adampal (II), Grusha Shumskogo (III), and Bere Slutskaya (IV): 3rd cluster

‘Маслянистая Летняя’ (‘Vasarine Sviestine’, ‘Летняя Маслянистая’, ‘Весарине Свиестине’) – литовский сорт народной селекции, происхождение которого неизвестно. Сорт широко распространен в странах Балтии и Беларуси.

По данным таблицы 4, аллельный состав образцов третьего кластера идентичен. Это послужило нам основанием считать, что образцы Бере Слуцкая, Груша Шумского и Адампаль в действительности – сорт ‘Маслянистая Летняя’. К тому же морфологическое описание, форма листовой пластинки, опушение с нижней стороны, форма плодов и вкус у данной группы образцов одинаковы.

Четвертый кластер включал контрольный сорт ‘Любимица Клаппа’ (рис. 7, I) и образцы, полученные от белорусских садоводов-любителей, поддерживаемые в коллекции под названиями «Марианна» (рис. 7, II), «Груша Авдитовского» (рис. 7, III) и «Эйсманты» (рис. 7, IV).

‘Любимица Клаппа’ (‘Clapp Favorite’, ‘Clapp’s Favorite’, ‘Favorytka’) получен Тадеушем Клаппом (США) от свободного опыления бельгийского сорта ‘Лесная Красавица’ (syn. 1 ‘Fondante des Bois’) в 1860 г. (Simirenko, 1972) или является гибридом между сортами ‘Вильямс’ (‘Bartlett’) и ‘Лесная Красавица’ (syn. 2 ‘Flemish Beauty’) (Sammarco, 2009). Это один из наиболее распространенных летних сортов груши в Северо-Кавказском и Нижневолжском регионах РФ, а также на Украине, в Молдове, Латвии, Литве, Эстонии и Средней Азии.

Образцы Марианна, Груша Авдитовского и Эйсманты поступили в коллекцию от любителей. По нашим наблюдениям, данные образцы демонстрировали явные сходства с сортом ‘Любимица Клаппа’, а именно имели типичную толстую изогнутую плодоножку. Мы предположили, что так как ‘Любимица Клаппа’ – старый сорт и распространен повсеместно, он мог неоднократно попадать в коллекцию под разными названиями. Проведенный молекулярный анализ показал, что данные образцы имеют одинаковый ДНК-профиль и составляют один кластер, что и подтвердило наши предположения.

Сорт ‘Подарок Краснокутский’ (рис. 8, I) и образец Семеновская (рис. 8, II) выделились в отдельные ветви дендрита.

‘Подарок Краснокутский’ – контрольный сорт, получен на Краснокутской опытно-селекционной станции (пгт. Краснокутск) А. И. Берендеем от сорта ‘Деканка Краснокутская’ свободным опылением в 1953 г.

Образец под названием «Семеновская», поступивший в коллекцию от любителя в 2014 г., по морфологическим признакам, внешнему виду, вкусу плодов, сроку хранения схож с сортом ‘Подарок Краснокутский’. Но по результатам микросателлитного анализа выяснилось, что исследуемые сорта имели различные генетические профили (см. табл. 4), то есть образец Семеновская не является двойником контрольного сорта.

I II III IV

Рис. 7. **‘Любимица Клаппа’ (I), Марианна (II), Груша Авдитовского (III) и Эйсманты (IV) – 4-й кластер**
Fig. 7. **‘Clapp Favorite’ (I), Marianna (II), Grusha Avditovskogo (III), and Eismanty (IV): 4th cluster**

I II

Рис. 8. **‘Подарок Краснокутский’ (I) и Семеновская (II) – 5-й и 6-й кластеры**
Fig. 8. **‘Podarok Krasnokutsky’ (I), and Semenovskaya (II): 5th and 6th clusters**

Заключение

Приоритетные маркеры EMPc117, EMPc11, CH04e03, CH01f07a, CH01d08, CH01d09, GD147, CH05c06 и CH03d12 при проведении молекулярно-генетического анализа показали высокую эффективность. Уровень аллельного полиморфизма (*He*) варьировал в пределах 0.52–0.89, в среднем это составило 0,77 единиц. Значение информативных аллелей – 5.44, общее число выявленных – 96, со средним значением на маркер – 8. Полученные в исследовании результаты согласуются (по общим маркерам ECPGR у изученных сортов) с данными анализа других авторов из Швеции, Германии, Англии, России, что может способствовать созданию общей базы данных по генетическим ресурсам.

Идентификация, основанная на анализе состава SSR-аллелей, позволила выявить дублирующие сорта в коллекции груши Института плодоводства Республики Беларусь, определив принадлежность ряда образцов, поступивших из других учреждений и собранных в результате экспедиционных обследований, к сортам ‘Талгарская Красавица’ (Нагима), ‘Любимица Клаппа’ (Марианна, Груша Авдитовского и Эйсманты), ‘Деканка дю Комис’ (Анджелейс) и ‘Маслянистая летняя’ (Бере Слуцкая, Груша Шумского и Адамполь), а также установить уникальность сортов ‘Подарок Краснокутский’ и ‘Семеновская’.

References / Литература

Alonso Segura J.M., Espiau Ramírez M.T., Pina Sobrino A., Rubio-Cabetas M.J., Fernández i Martí Á. Genetic diversity of the Spanish Pear Germplasm Collection assessed by SSRs. *Acta Horticulture*. 2021;1303:37-44. DOI: 10.17660/ActaHortic.2021.1303.6

Asanidze Z., Akhalkatsi M., Henk A.D., Richards C.M., Volk G.M. Genetic relationships between wild progenitor pear (*Pyrus* L.) species and local cultivars native to Georgia, South Caucasus. *Flora – Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*. 2014;209(9):504-512. DOI: 10.1016/j.flora.2014.06.013

De Andres M.T., Cabezas J.A., Cervera M.T., Borrego J., Martínez-Zapater J.M., Jouve N. Molecular characterization of grapevine rootstocks maintained in germplasm collections. *American Journal of Enology and Viticulture*. 2007;58(1):75-86. DOI: 10.5344/ajev.2007.58.1.75

Đurić G., Tomić L., Mićić N., Cvetković M., Radoš L., Pašalić B. Fruit genetic resources in Republika Srpska. *Acta Agriculturae Serbica*. 2009;14(28):31-40.

Evans K.M., Fernández-Fernández F., Govan C. Harmonising fingerprinting protocols to allow comparisons between germplasm collections – *Pyrus*. *Acta Horticulturae*. 2009;814:103-106. DOI: 10.17660/ActaHortic.2009.814.10

Ferradini N., Lancioni H., Torricelli R., Russi L., Dalla Ragione I., Cardinali I. et al. Characterization and phylogenetic analy-

sis of ancient Italian landraces of pear. *Frontiers in Plant Science*. 2017;8:751. DOI: 10.3389/fpls.2017.00751

Galinskaya T.V., Schepetov D.M., Lysenkov S.N Prejudices against microsatellite studies and how to resist them. *Russian Journal of Genetics*. 2019;55(6):657-671. DOI: 10.1134/S1022795419060048

Gasi F., Kurtovic M., Kalamujic B., Pojskic N., Grahic J., Kaiser C. et al. Assessment of European pear (*Pyrus communis* L.) genetic resources in Bosnia and Herzegovina using microsatellite markers. *Scientia Horticulture*. 2013;157:74-83. DOI: 10.1016/j.scienta.2013.04.017

Katseyko A.N. The results of the work on breeding new cultivars of apple, pear and strawberry in the Alma-Ata fruit-growing zone (Itogi rabot po vyvedeniyu novykh sortov yabloni, grushi i zemlyaniki v Almaatinskoy zone plodovodstva). *Trudy Instituta zemledeliya imeni V.R. Vilyamsa = Proceedings of the V.R. Williams Institute of Crop Farming.* 1956;5:6-56. [in Russian] (Кацейко А.Н. Итоги работ по выведению новых сортов яблони, груши и земляники в Алма-Атинской зоне плодоводства. *Труды Института земледелия имени В.Р. Вильямса*. 1956;5:6-56).

Kazlouskaya Z.A., Fralova L.V., Taranau A.A., Yakimovich V.A., Palubiatka I.G. Mobilization of fruit, small fruit and nut crop genetic resources in Belarus. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021;182(3):20-29. [in Russian] (Козловская З.А., Фролова Л.В., Таранов А.А., Якимович О.А., Полубятко И.Г. Мобилизация генетических ресурсов плодовых, ягодных и орехоплодных культур в Беларуси. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2021;182(3):20-29). DOI: 10.30901/2227-8834-2021-3-20-29

Kazlouskaya Z.A., Yakimovich V.A. Main results of the introduction of pome fruit cultivars in Belarus. In: *International Conference "125 Years of Applied Botany in Russia": Book of Abstracts*. St. Petersburg: VIR; 2019. p.146. [in Russian] (Козловская З.А., Якимович О.А. Основные результаты интродукции сортов семечковых плодовых культур в Беларуси. В кн.: *Международная конференция «125 лет прикладной ботаники в России»: сборник тезисов*. Санкт-Петербург: ВИР; 2019. С.146). DOI: 10.30901/978-5-907145-39-9

Kocsisné G.M., Bolla D., Anhalt-Brüderl U.C.M., Forneck A., Taller J., Kocsis L. Genetic diversity and similarity of pear (*Pyrus communis* L.) cultivars in Central Europe revealed by SSR markers. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2020;67(3):1755-1763. DOI: 10.1007/s10722-020-00937-0

Martsynkevich T.M., Yakimovich V.A., Kazlouskaya Z.A. Evaluation of the hybrids progeny of variety Talgarskaya krasavitsa to pear scab resistance and the identification gene fragment to scab resistance. *Fruit Growing*. 2017:41-47. [in Russian] (Марцинкевич Т.Н., Якимович О.А., Козловская З.А. Оценка гибридного потомства сорта Талгарская красавица на устойчивость к парше груши и выявление фрагмента гена устойчивости. *Плодоводство*. 2017:41-47).

Nadeem M.A., Nawaz M.A., Shahid M.Q., Doğan Y., Comertpay G., Yildiz M. et al. DNA molecular markers in plant breeding: current status and recent advancements in genomic selection and genome editing. *Biotechnology and Biotechnological Equipment*. 2018;32(2):261-285. DOI: 10.1080/13102818.2017.1400401

Nei M., Roychoudhury A.K. Sampling variances of heterozygosity and genetic distance. *Genetics.* 1974;76(2):379-390. DOI: 10.1093/genetics/76.2.379

Nishio S., Takada N., Saito T., Yamamoto T., Iketani H. Estimation of loss of genetic diversity in modern Japanese cultivars by comparison of diverse genetic resources in Asian pear (*Pyrus* spp.). *BMC Genetics*. 2016;17(1):81. DOI: 10.1186/s12863-016-0380-7

Nybom H., Weising K. DNA-based identification of clonally propagated cultivars. In: J. Janick (ed.). *Plant Breeding Reviews*. *Vol. 34.* Hoboken, NJ: John Wiley & Sons; 2011. p.221-295. DOI: 10.1002/9780470880579.ch6

Ouni R., Zborowsksa A., Sehic J., Choulak S., Iñaki Hormaza J., Garkava-Gustavsson L. et al. Genetic diversity and structure of Tunisian local pear germplasm as revealed by SSR markers. *Horticultural Plant Journal*. 2020;6(2):61-70. DOI: 10.1016/j.hpj.2020.03.003

Reim S., Lochschmidt F., Proft A., Wolf H., Wolf H. Species delimitation, genetic diversity and structure of the European indigenous wild pear (*Pyrus pyraster*) in Saxony, Germany. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2016;64(5):1075-1085. DOI: 10.1007/s10722-016-0426-8

Sammarco A.M. He who hybridized the Clapp's Favorite pear. *The Forest Hills Educational Trust* (blog); 2009. Available from: http://foresthillstrust.blogspot.com/2009/12/he-who-hybridized-clapps-favorite-pear.html [accessed Nov. 20, 2024].

Sehic J., Garkava-Gustavsson L., Fernández-Fernández F., Nybom H. Genetic diversity in a collection of European pear (*Pyrus communis*) cultivars determined with SSR markers chosen by ECPGR. *Scientia Horticulture*. 2012;145:39-45. DOI: 10.1016/j.scienta.2012.07.023

Simirenko L.P. Pomology. Vol. 2. Pear (Pomologiya. T. 2. Grusha). Kiev: Urozhay; 1972. [in Russian] (Симиренко Л.П. Помология. Т. 2. Груша. Киев: Урожай; 1972).

Taheri S., Lee Abdullah T., Yusop M.R., Hanafi M.M., Sahebi M., Azizi P. et al. Mining and development of novel SSR markers using next generation sequencing (NGS) data in plants. *Molecules*. 2018;23(2):399. DOI: 10.3390/molecules23020399

Urbanovich O.Yu., Kazlouvskaya Z.A., Yakimovich V.A., Kartel N.A. Polymorphism of SSR alleles in pear cultivars grown in Belarus. *Russian Journal of Genetics*. 2011;47(3):305-313. DOI: 10.1134/S1022795411030173

Wolko Ł., Bocianowski J., Andkowiak W., Słomski R. Genetic diversity and population structure of wild pear (*Pyrus pyraster* (L.) Burgsd.) in Poland. *Open Life Sciences*. 2014;10(1):19-29. DOI: 10.1515/biol-2015-0003

Xuan H., Mayr U., Büchele M. Fingerprinting practices applied to the KOB heritage apple cultivars using SSRs as proposed by the ECPGR-FN. *Acta Horticulture*. 2010;859:183-190. DOI: 10.17660/ActaHortic.2010.859.22

Yakimovich O.A. 'Talgarskaya krasavitsa' pear variety in the conditions of Belarus. *Fruit Growing*. 2019;31(1):49-54. [in Russian] (Якимович О.А. Сорт груши Талгарская красавица в условиях Беларуси. *Плодоводство*. 2019;31(1):49-54).

Yamamoto T., Kimura T., Sawamura Y., Manabe T., Kotobuki K., Hayashi T. et al. Simple sequence repeats for genetic analysis of pear. *Euphytica*. 2002;124(1):129-137. DOI: 10.1023/A:1015677505602

Zeljković M.K., Bosanćić B., Đurić G., Flachowsky H., Garkava-Gustavsson L. Genetic diversity of pear germplasm in Bosnia and Herzegovina, as revealed by SSR markers. *Zemdirbyste-Agriculture*. 2021;108(1):71-78. DOI: 10.13080/z-a.2021.108.010

Zeljković M.K., Ivanovska S., Đurić G. Phenological characteristics and global tree architecture of the pear germplasm from Bosnia and Herzegovina in *ex situ* conditions. *Journal of Agricultural, Food and Environmental Sciences*. 2019;73(1):83-91. DOI: 10.55302/JAFES19731083kz

Информация об авторах

Татьяна Николаевна Марцинкевич, старший научный сотрудник, Институт плодоводства, 223013 Беларусь, Самохваловичи, ул. Ковалева, 2, 87martany@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-5068-1121

Ольга Александровна Якимович, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт плодоводства, 223013 Беларусь, Самохваловичи, ул. Ковалева, 2, pear.belsad@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4408-2805

Юлия Георгиевна Кондратенок, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт плодоводства, 223013 Беларусь, Самохваловичи, ул. Ковалева, 2, apple.julia.kon@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-0055-5254

Наталья Валерьевна Кухарчик, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий отделом, Институт плодоводства, 223013 Беларусь, Самохваловичи, ул. Ковалева, 2, nkykhartchyk@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-6658-9309

Александр Николаевич Рымко, кандидат биологических наук, директор, Общество с ограниченной ответственностью «АртБиоТех», 220084 Беларусь, Минск, ул. Купревича, 1/3, каб. 337, info@qpcr.by, https://orcid.org/0009-0005-7872-6463

Information about the authors

Tatsiana M. Martsynkevich, Senior Researcher, Institute for Fruit Growing, 2 Kovaleva St., Samokhvalovichi 223013, Belarus, 87martany@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-5068-1121

Volha A. Yakimovich, Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor, Leading Researcher, Institute for Fruit Growing, 2 Kovaleva St., Samokhvalovichi 223013, Belarus, pear.belsad@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4408-2805

Julia G. Kandratsenak, Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor, Leading Researcher, Institute for Fruit Growing, 2 Kovaleva St., Samokhvalovichi 223013, Belarus, apple.julia.kon@gmail.com, https://orcid.org/0009-0005-0055-5254

Natallia V. Kukharchyk, Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Head of a Department, Institute for Fruit Growing, 2 Kovaleva St., Samokhvalovichi 223013, Belarus, nkykhartchyk@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-6658-9309

Aliaksandr M. Rymko, Cand. Sci. (Biology), Director, ArtBioTech Limited Liability Company, 1/3, office 337, Kuprevicha St., Minsk 220084, Belarus, info@qpcr.by, https://orcid.org/0009-0005-7872-6463

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 23.01.2025; одобрена после рецензирования 27.05.2025; принята к публикации 21.07.2025.
The article was submitted on 23.01.2025; approved after reviewing on 27.05.2025; accepted for publication on 21.07.2025.

IDENTIFICATION OF THE DIVERSITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES FOR SOLVING FUNDAMENTAL AND APPLIED PROBLEMS

Original article
UDC 633.13;57
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-245-259

CC BY

Release of two hexaploid oat (*Avena sativa* L.) cultivars with high nutritive value of groat for human consumption: an innovation at the Moroccan national level

Nezha Saidi[1], Naima Shaimi[1], Mouna Taghouti[1], Aouatif Benali[1], Rajae Manzali[1, 2], Salma Touil[1, 3], Ahmed Douaik[1], Fatima Gaboun[1], Mohamed Bouksaim[1], Chawki Al Faiz[1], Gideon Ladizinsky[4]

[1] *National Institute for Agricultural Research, Regional Center for Agricultural Research of Rabat, Rabat, Morocco*

[2] *Hassan I University, Settat, Morocco*

[3] *Ibn Tofail University, Kenitra, Morocco*

[4] *United States Agency for International Development, Washington DC, USA*

Corresponding author: Nezha Saidi, nezha.saidi@inra.ma

Moroccan oat breeding has traditionally targeted forage yield, yet the wild tetraploid oat species *Avena murphyi* Ladiz. possesses protein- and *β*-glucan-enhancing alleles largely absent from cultivated germplasm.
The two decades of research, exploiting the wild tetraploid oat species *A. murphyi* through backcross introgression led to the release of the first Moroccan improved hexaploid oats cultivars, 'Al Fawze' and 'Abtah', developed for human consumption.
Peer-reviewed papers, institutional reports and breeder datasets were screened for local *Avena* L. diversity and conservation, interspecific hybridization procedures, multi-environment performance under rainfed Mediterranean conditions, and nutritional and techno-functional traits relevant to food, feed and industrial use.
Introgressed lines achieved 17% groat protein content, 5% groat *β*-glucan content and 38 g thousand-kernel weight while sustaining 34–43 q ha^{-1} grain yield in addition to broad resistance to crown rust, powdery mildew, and BYDV. A 20% substitution of bread-wheat flour with 'Al Fawze' flour increased loaf protein by 14% without altering dough rheology, signaling immediate value for bakery and cereal products.
Leveraging endemic wild germplasm fast-tracked the creation of climate-adapted, nutrient-dense oats for human consumption. Next steps include certified-seed scale-up, processor partnerships, and consumer-focused validation of sensory quality, sustainability, and health benefits.

Keywords: forage crop, *Avena murphyi*, hybridization, bioactive compounds, *β*-glucans, groat proteins, indigenous genetic resources, wild species

Acknowledgments: this work was granted the Hassan II grand prize for invention and research in the agriculture class of advanced sciences and techniques, 12th edition 2021. The research was partially funded by the United States Agency for International Development (USAID), Project No. TAMOU 97-053, under the supervision of the project principal investigator Prof. Gideon Ladizinsky.
Dr. Nezha Saidi would like to acknowledge all colleagues who contributed to the achievement of this work, namely A. Souihka, A. Salih Idrissi, M. Ksiba, M. Amer, the late A. Abtah, H. Benardi, A. Baammi, and M. Nechach in addition to the students of bachelor and master degrees.
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Saidi N., Shaimi N., Taghouti M., Benali A., Manzali R., Touil S., Douaik A., Gaboun F., Bouksaim M., Al Faiz C., Ladizinsky G. Release of two hexaploid oat (*Avena sativa* L.) cultivars with high nutritive value of groat for human consumption: an innovation at the Moroccan national level. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(3):245-259. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-245-259

© Saidi N., Shaimi N., Taghouti M., Benali A., Manzali R., Touil S., Douaik A., Gaboun F., Bouksaim M., Al Faiz C., Ladizinsky G., 2025

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ПРОБЛЕМ

Научная статья
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-245-259

Создание двух гексаплоидных сортов овса (*Avena sativa* L.) пищевого назначения с высокой питательной ценностью крупы: национальная инновация Марокко

Н. Саиди[1], Н. Шайми[1], М. Тагути[1], А. Бенали[1], Р. Манзали[1, 2], С. Туил[1, 3], А. Дуаик[1], Ф. Габун[1], М. Буксаим[1], Ш. Аль Фаиз[1], Г. Ладизинский[4]

[1] *Национальный институт сельскохозяйственных исследований, Региональный центр сельскохозяйственных исследований Рабата, Рабат, Марокко*

[2] *Университет Хасана I, Settat, Марокко*

[3] *Университет Ибн Тофаила, Кенитра, Марокко*

[4] *Агентство США по международному развитию, Вашингтон, округ Колумбия, США*

Автор, ответственный за переписку: Нежа Саиди, nezha.saidi@inra.ma

Селекция марокканского овса традиционно нацелена на урожайность кормового зерна, однако дикий тетраплоидный вид овса *Avena murphyi* Ladiz. обладает аллелями, повышающими содержание белка и β-глюканов в зерне, которое значительно превосходит показатели возделываемых сортов.

Два десятилетия изучения интрогрессии возвратного скрещивания с использованием популяций дикого тетраплоидного вида овса *A. murphyi* привели к созданию первых марокканских улучшенных гексаплоидных сортов овса 'Al Fawze' и 'Abtah' пищевого назначения.

Рецензируемые статьи, научные отчеты и базы данных селекционеров проанализировали на предмет местного разнообразия и сохранения генетических ресурсов рода *Avena* L. Провели межвидовые скрещивания и полевые испытания гибридов в нескольких почвенно-климатических зонах Средиземноморья с богарным земледелием, изучили биохимические и технологические признаки, значимые для пищевого, кормового и технического направлений использования культуры.

Крупа интрогрессивных линий овса содержала до 17% белка и до 5% β-глюканов, масса 1000 зерновок достигала 38 г, урожайность зерна сохранялась на уровне 34–43 ц/га, выявлена комплексная устойчивость к корончатой ржавчине, мучнистой росе и вирусу желтой карликовости ячменя. При замещении 20% муки мягкой пшеницы мукой сорта овса 'Al Fawze' содержание белка в полученном хлебе составляло 14% без изменения реологии теста, что свидетельствует о повышении качества хлебобулочных и других пищевых изделий из этой муки.

Использование эндемичной дикой зародышевой плазмы ускорило создание хорошо адаптированных, богатых питательными веществами новых сортов овса для пищевого использования. Следующими шагами станут масштабное увеличение производства сертифицированных семян, заключение партнерских соглашений с переработчиками, проверка вкусовых качеств продукции, ее экологической чистоты и пользы для здоровья человека.

Ключевые слова: кормовая культура, *Avena murphyi*, гибридизация, биоактивные вещества, β-глюканы, содержание белка, местные генетические ресурсы, дикие виды

Благодарности: работа удостоена главной премии Хасана II, присуждаемой за изобретения и исследования в области сельского хозяйства в классе передовых наук и технологий, в 12-й редакции 2021 г. Исследование частично профинансировано Агентством США по международному развитию (USAID) в рамках проекта № TAMOU 97-053 под руководством главного исследователя проекта проф. Гидеона Ладизинского.

Д-р Нежа Саиди хотела бы выразить признательность всем коллегам, которые внесли свой вклад в выполнение этой работы, а именно А. Суихке, А. Салиху Идрисси, М. Ксибе, М. Амере, покойному А. Абтаху, Х. Бенарди, А. Баамми, М. Нехачу, а также студентам бакалавриата и магистратуры.

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

***Для цитирования*:** Саиди Н., Шайми Н., Тагути М., Бенали А., Манзали Р., Туил С., Дуаик А., Габун Ф., Буксаим М., Аль Фаиз Ш., Ладизинский Г. Создание двух гексаплоидных сортов овса (*Avena sativa* L.) пищевого назначения с высокой питательной ценностью крупы: национальная инновация Марокко. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(3):245-259. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-245-259

Introduction

Global and national production context

Agriculture remains central to livelihoods and development in many regions, and cereals underpin human and animal nutrition because of their energy density and versatility. Within this group, oats have attracted renewed attention for both resilience and food-grade value. According to FAOSTAT, oat ranks as the seventh most economically important cereal worldwide, after maize, rice, wheat, barley, sorghum, and millet. In 2023, global oat production was projected to decline markedly to ~23.1 million tons, the lowest in 11 years, mainly due to reduced planted areas and yields in Canada, the European Union, and the United States. Over the same horizon, total coarse grains were expected at ~1,511 million tons, with maize at a record ~1,215 million tons; total cereals near ~2,815 million tons (https://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/en).

In Morocco, FAOSTAT time series also show fluctuations: ~15,009 ha and ~5,551 t in 2020; 17,845 ha and 6,390 t in 2021; 13,040 ha and 3,740 t in 2022, reflecting the rainfall dependence of rainfed systems (https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL).

Importance and utilization of oats

Oats have long been important as livestock feed (grain, green fodder, silage, and hay) and are valued for their high fodder nutritional value and dry matter digestibility exceeding 75%. Oat straw also exhibits more digestible organic matter than other cereal straws, which is appreciated by livestock (Stevens et al., 2004). In parallel, oats remain an important grain for populations in marginal areas in emerging countries. Oat seeds combine proteins of high nutritional value, oils, and health-promoting constituents such as avenanthramides and tocols (Peterson, Mannerstedt Fogelfors, 2004; Alrahmany, Tsopmo, 2012). Classic work highlighted that oat groat proteins have a favorable amino acid balance that remains stable even when total protein increases through genetic progress (Clamot, 1979; Welch et al., 2000). Higher groat oil (unsaturated fatty acids) increases energy density and has potential for industrial extraction (e.g., biofuel). (1→3),(1→4)-β-D-glucans are a major component implicated in lowering plasma cholesterol; groat protein and oil remain key grain quality traits (Zhu et al., 2004). Medical studies favoring whole-grain fiber intake to reduce blood cholesterol and intestinal/colon cancer risk underpinned the 1990s resurgence of interest in oats for human health (Harlan, 1992). Bran and caryopsis residues also enable furfural production for solvent and pharmaceutical applications (Harlan, 1992; Saidi, 2015).

Oat cultivation in Morocco

Oats are grown as a winter crop in favorable and intermediate rainfed regions, either as a pure stand or mixed with vetch (notably in the Saïs), for hay, green fodder, and grain. Oats contribute significantly to dairy systems in northwestern Morocco, while barley dominates in the middle and lower semi-arid zones; fodder yield depends on the cutting stage and cutting × genotype × environment interactions (Al Faiz et al., 1997). Cultivated area has often exceeded 100,000 ha (≈70,000 ha pure, and 50,000 ha vetch–oat), making oats the third fodder crop after alfalfa and barley and contributing ~36% of total fodder production (Al Faiz et al., 2004; Saidi, Al Faiz, 2008). The 2020–2022 FAOSTAT figures cited above confirm the recent volatility in area and output (https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL).

Oat genetic resources in Morocco

Morocco is a center of diversification for *Avena*, with ~30 wild species (Saidi, Ladizinsky, 2005). Endemic taxa include *A. atlantica* B.R. Baum. & Fedak. (2n = 2x = 14), *A. agadiriana* B.R. Baum. & Fedak. and *A. magna* Murphy & Terrell (2n = 4x = 28), while *A. murphyi* Ladiz. (2n = 4x = 28) and *A. prostrata* Ladiz. (2n = 2x = 14) are found in limited northern regions (Leggett, 1992). Although hexaploid cultivated oat (*A. sativa* L.) is important for feed and food, limited efforts have historically targeted conservation and use of wild relatives to enrich the cultivated gene pool narrowed by selection (Leggett, 1992). From the mid-1960s, breeders undertook introgression from wild oats to improve groat nutritive value, leading to protein-rich cultivars (Moser, Frey, 1994). Foundational cytogenetic studies clarified affinities among wild and cultivated *Avena*, suggesting tetraploids (e.g., *A. murphyi*) underpinned hexaploid evolution (Ladizinsky, 1969; Thomas, Bhatti, 1975). Tetraploids with AADD genomes share morphological traits with AACCDD hexaploids, facilitating hybridization owing to chromosome similarity (Rajhathy, Sadasivaiah, 1969; Thomas et al., 1980). This rationale supported interspecific crosses to transfer desirable alleles from wild to cultivated backgrounds (Ladizinsky, Johnson, 1972; Ladizinsky, Fainstein, 1977a; Loskutov, 2001b; Loskutov, Rines, 2011; Manzali et al., 2023, 2025).

Why broadening the genetic base of A. sativa matters now?

Modern hexaploid oats have a relatively narrow genetic base, constraining progress in agronomic performance (yield stability, disease resistance) and techno-functional quality (kernel geometry, groat recovery, protein, oil, β-glucans) under rainfed Mediterranean conditions. In contrast, the tetraploids *A. magna* and *A. murphyi* endemic and edapho-climatically adapted to Morocco carry very high groat protein (up to ~30%), elevated oil, large kernels (1000-kernel weight ≈ 35 g), strong tillering, and resistance to powdery mildew and crown rust (Ladizinsky, Fainstein, 1977a; Leggett, 1992; Loskutov, 2001a). Their strong meiotic affinity with cultivated oats (AADD ↔ AACCDD) enables efficient allele transfer; the homoeology of major loci for groat protein further favors backcrossing (Rajhathy, Sadasivaiah, 1969; Thomas, Bhati, 1975; Marshall et al., 1992; Welch et al., 2000; Zhu et al., 2004).

Moroccan breeding program redirected toward food-grade oats

Since the early 1980s, INRA-Morocco has released hexaploid cultivars adapted to contrasting agroclimates (Al Faiz, 1990). The first-wave 21 hulled and two naked oats, derived from temperate North-American introductions, focused on forage biomass and rust tolerance. However, shared pedigrees eroded resistance durability (crown rust, BYDV, smut) and limited physiological plasticity under recurrent drought. Anticipated climate-change pressures in North Africa reinforce the need for novel alleles to stabilize yield while raising grain quality endpoints. Morocco's secondary diversification center provides such variability, notably tetraploids *A. murphyi* and *A. magna* (Leggett, 1992; Saidi, Ladizinsky, 2005). Building on this evidence, INRA redirected its program in the 2000s toward food-grade oats. One pipeline implemented interspecific introgression via repeated backcrosses between the Moroccan hexaploid cultivar 'Amlal' and a wild *A. murphyi* accession from northern Morocco, followed by pedigree selection to genetic stability (Saidi et al., 2016). Subsequent multilocation trials under rainfed and irrigated conditions

have evaluated advanced lines for agronomy and food-relevant grain quality (Saidi et al., 2020, 2025).

Study gap, hypothesis, and objectives

Despite strong biological and historical reasons to leverage Moroccan tetraploids for broadening *A. sativa*, there is still a shortage of integrated evidence linking introgression to the combined response of (i) agronomic performance (yield, disease resistance) and (ii) techno-functional grain traits (thousand-kernel weight, groat recovery, groat protein, *β*-glucans) under rainfed Mediterranean conditions. This study reports the development and multi-environment testing of two hexaploid oat lines derived from repeated backcrosses between 'Amlal' and *A. murphyi*, documents ploidy stabilization and phenotypic segregation through eight generations of pedigree selection, and evaluates agronomic performance and grain quality gains relative to commercial checks, with an emphasis on food-grade applications. We hypothesized that introgression from *A. murphyi* would increase the mean and variance for targeted quality and processing traits while maintaining or improving yield and disease resistance, thereby broadening the effective genetic base of *A. sativa* for Mediterranean breeding programs (Ladizinsky, Fainstein, 1977a; Loskutov, 2001a; Welch et al., 2000; Zhu et al., 2004; Saidi et al., 2016, 2020, 2025).

Material and methods

Plant material

The study used two parental materials. The wild tetraploid donor was *Avena murphyi* accession P45-55 (2n = 4x = 28) collected in the Tangier region, described with 23.7 g 100 g^{-1} DM of groat protein and tolerance to BYDV. The recurrent parent was *A. sativa* cv. 'Amlal' (2n = 6x = 42), registered in 1996 in the Moroccan national catalogue; semi-early, adapted to rainfed zones of northwestern Morocco, with typical yield/quality traits as stated in the original manuscript. Program descendants used as benchmarks in advanced trials: 'Amlal' (conventional control) and the released introgression descendants 'Al Fawze' and 'Abtah' from the same pipeline.

Methods

Interspecific crosses and backcrossing

The first crossing cycle was realized under greenhouse conditions in the early 2000s. The hexaploid parent *A. sativa* cv. 'Amlal' (2n = 6x = 42), used as a female parent after manual emasculation, was manually pollinated by the pollen collected from the tetraploid parent plants of *A. murphyi* (P45-55) (Fig. 1). Collected hybrid seeds were backcrossed to their hexaploid parent in the field, at the INRA–Morocco Experiment Station in Marchouch, located 65 km southeast of Rabat (longitude 6°71 600 W, latitude 33°60 499 N, 410 masl).

Ploidy determination

Ploidy of the hybrid seeds derivative from the undertaken crosses was determined using the conventional method in order to select hybrids having the hexaploid ploidy level (2n = 6x = 42). The determination of chromosome number was checked in root tips of the pregerminated hybrid seeds in Petri dishes after being treated according to R. J. Singh's methodology (2016). Chromosomes were visualized and counted using an optical microscope.

Morphological characterization

In order to analyze the segregation of the spikelet phenotypic characters of the hexaploid hybrid seeds, the progeny was characterized for wild morphological characters such as absence/presence of awns, awn vigor, seed color, and lemma hairiness.

Pedigree selection

F_2 progenies were grown at INRA–Marchouch (33° 47'N, 06° 71' W) and advanced to F_8 by pedigree selection to reach genetic stability prior to quantitative evaluation.

Crop establishment and site conditions

At the Marchouch Experiment Station, average annual precipitation during the seed-increase period was ≈ 374 mm (mean of 571, 296 and 255 mm reported by the station), with a mean annual temperature ~23.79°C; soils are described as rich black, crumbling and well-drained. Plots at the station were managed in RCBD, 4 rows × 1 m (4 m^2), 3 replications, with manual weeding and no chemical herbicides or N fertilizer applied.

Field establishment for the performance trials followed the national guidance for oats: late October to late November sowing, row spacing 15–20 cm, depth 2–5 cm, and post-sowing rolling when needed (rate adjusted to thousand-kernel weight), with trials conducted under rainfed conditions.

Assessment of agronomic performance

Preyield (behavior) trials

Location and design. Eighth-generation, true-breeding progenies were grown for two consecutive seasons (2020/21 and 2021/22) at the INRA–Marchouch Experiment Station (33°47′ N, 06°71′ W, 410 masl) in a randomized complete-block design (RCBD) with four replications, following the layout principles of K. A. Gomez and A. A. Gomez (1984). Each plot contained six 5 m rows spaced 0.20 m apart (6 m^2).

Traits recorded. Days to heading and physiological maturity were noted when 50 % of spikes reached the target stage; early vigor was rated 1–9 at tillering (Oelke et al., 1992). Plant height and lodging (%) were measured at the milk stage. Grain yield was obtained by combine-harvesting the central four rows, cleaning, and adjusting to 120 g kg^{-1} seed moisture (International Seed Testing Association, 2018). Aboveground biomass was cut at the milk stage, oven-dried (65°C, 48 h), and expressed as dry-matter yield (t ha^{-1}).

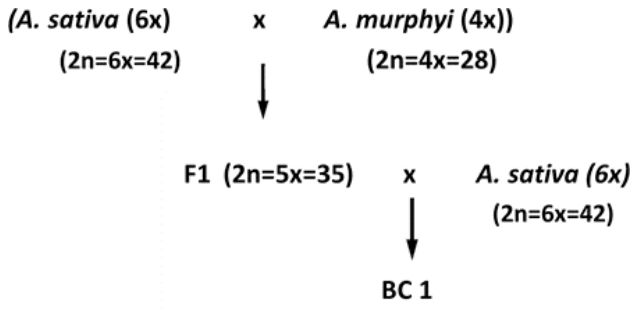


Fig. 1. **Crossing pattern**

Рис. 2. **Схема скрещивания**

Advanced multilocation trials

Sites and seasons. The three best preyield performers plus two commercial checks ('Amlal' and 'Al Fawze') were evaluated for three seasons (2022/23–2024/25) at five rainfed sites: Marchouch, Meknes, Tassaout, Tangier, and Sidi Allal Tazi (300–650 mm of annual rainfall) representing Morocco's principal oat zones (Al Faiz et al., 1997).

Experimental layout. Trials followed an RCBD with four replications; plot size and management matched the preyield stage. Basal fertilizer (60 kg N + 60 kg P_2O_5 ha^{-1}) was applied according to the national oat guidelines (ONSSA, 2020); weeds were hoed manually to avoid herbicide × genotype interactions.

Disease and pest assessment.

Crown rust (*Puccinia coronata* f. sp. *avenae* P. Syd. & Syd.) and powdery mildew (*Blumeria graminis* (DC) Speer) were rated twice (booting and soft-dough) on the modified Saari–Prescott 0–100 severity scale; on each date, severity (%) was estimated on 20 tillers per plot taken from the central rows (edge rows excluded) to avoid border effects. No foliar fungicides or insecticides were applied, and infection relied on natural field pressure (Saari, Prescott, 1975).

Barley yellow dwarf virus (BYDV) symptoms were scored at late tillering on a 0–5 ordinal scale where 0 = no reddening, and 5 = severe stunting with leaf reddening; scores were recorded on 20 tillers per plot from central rows (Comeau, Haber, 1986).

Insect pests. Natural infestations of oat aphid (*Rhopalosiphum padi* L.) and armyworm (*Mythimna unipuncta* Haworth) were monitored weekly from stem elongation to early grain fill on 10 randomly selected tillers per plot (central rows). Resistance was indexed as the area under the pest progress curve (AUPPC), computed by the trapezoidal method from consecutive weekly counts as described by M. J. Jeger and S. L. H. Viljanen-Rollinson (2001); higher AUPPC indicates greater pest pressure. (Jeger, Viljanen-Rollinson, 2001)

Assessment of grain quality parameters

Weight of one thousand seeds (WTS)

The weight of one thousand seeds was determined according to the ISTA rules (International Seed Testing Association, 1985). A sample of 1000 seeds per line in three replications was weighted. The WTS is the average of the weights of the three samples expressed in grams.

Determination of groat and husk proportions

Groat and husk proportions were calculated according to the methodology described by (Doehlert et al., 1999) and (Hall et al., 2003). This method consists of counting and weighing 100 grains in three replications per line and carrying out the husking and weighing of groat and husks separately. Proportions (%) are calculated by:

(Groat or husk weight / 100-seed weight) / 100

Determination of groat protein content

Whole oat groats were first ground in an IKA MF-10 basic impact mill equipped with a 0.5 mm stainless-steel screen to obtain a uniform flour. Crude protein was then measured by the Kjeldahl procedure (AOAC 979.09): after digestion, distillation and capture of the liberated ammonia in boric acid, the distillate was back-titrated with 0.1 N HCl. Protein content on a dry-matter basis was calculated as:

$$\text{Protein (\%DM)} = \frac{(V-V0)\times 1000\times N\times 14\times F\times 100}{P\times DM\%},$$

where V and V_0 are the titrant volumes for sample and blank (mL); N is acid normality (0.1); 14 is the atomic mass of nitrogen; F is the nitrogen-to-protein factor (6.25 for oat flour, or 5.7 for wheat flour); P is the test portion (g); DM % is the sample dry-matter content.

Determination of groat ß-glucan content

The content of soluble *ß*-glucans in groat was measured through an enzymatic method according to AACC (32-23), AOAC (995-16), and ICC (168), using a kit of mixed *ß*-glucans (Megazyme International Ltd., Wicklow, Ireland) suggested by B. V. McCleary et al. (2006).

Analysis of the nutritional quality and preliminary tests of flour mixtures' rheological behavior

Mixtures of flours were made from bread wheat cv. 'Kenz' and different proportions of hexaploid oat flour from cv. 'Al Fawze', selected from the hybrid lines resulting from the interspecific crosses realized between hexaploid oat cv. 'Amlal' and the wild tetraploid oat accession of *A. murphyi* P45-55, selected for its high groat nutritional value, registered in the INRA–Morocco official catalogue, and used here as an initiative test for industrial uses**.** All flour mixtures were analyzed for the ability to form bread with good technological and nutritional characteristics. Mixtures with different oat incorporation proportions of flour in wheat flour at the rates of 10%, 15%, 20%, 25% and 30% were baked and subjected to gastronomic tests.

Dough formulation (baker's % on total flour): 1% of salt, 1.5% of baker's yeast, and 53% of water.

The sedimentation index of wheat–oat composite flours was measured using the Zeleny sedimentation test following AACCI Method 56-61.02 and ICC Standard 116/1; results were expressed in milliliters, with readings corrected for flour moisture as specified in the method. Triplicate determinations were performed per formulation.

Loaf volume was determined within 30 min of baking by the rapeseed displacement method (AACCI 10-05.01); each value is the mean of at least three loaves per treatment. Specific volume was calculated as loaf volume divided by loaf weight (cm^3 g^{-1}), and crumb density as loaf weight divided by loaf volume (g cm^{-3}).

Registration in the Moroccan official catalogue

The registration in the INRA–Morocco official catalogue of the selected lines as new cultivars was done according to UPOV standards of distinction, homogeneity and stability (DHS), and agronomic and technological value tests (ATV).

Chemicals and reagents

All chemicals and reagents (acids, bases, salts, buffers, and organic solvents used for sample preparation, Kjeldahl digestion/distillation, and *β*-glucan extraction) were analytical grade and purchased from Sigma-Aldrich/Merck (Merck KGaA, Darmstadt, Germany; distributed by Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA). The mixed-linkage *β*-glucan assay kit was obtained from Megazyme (Wicklow, Ireland).

Statistical analysis

The obtained results were statistically processed with SAS 9.3 (SAS Institute, Cary NC), using ANOVA analysis of variance (Proc Glmprocedure) and a posteriori multiple comparison of means by Duncan's test. $P < 0.05$ values were considered as significant.

Results and discussion

Interspecific crosses

The first crossing cycle generated pentaploid hybrids (2n = 5x = 35) with a very low fertility rate. In order to restore their fertility, pentaploid hybrids were backcrossed to their hexaploid parent and 30 hybrids were thus obtained.

Ploidy analysis of hybrid seeds

Ploidy examination of the backcrossed hybrid seeds revealed that their chromosome number varied from 34 to 45; with 72% of the hybrids having a hexaploid ploidy level. This confirms that most fertile female gametes of the first hybridization cycle had 20 to 21 chromosomes. In addition, analysis of pollen fertility showed that 28% hybrid plants had pollen fertility above 50%. We noticed that even plants with an aneuploid chromosome number had good fertility, which translated into good grain yield (Fig. 2). The study of the correlation of pollen fertility to the other parameters, using the Pearson coefficient, showed that the correlation of pollen fertility with chromosome number was not significant ($r = 0.19$, $P < 0.05$), but on the other hand it was highly significant with grain yield ($r = 0.61^{***}$, $P < 0.001$). According to G. Ladizinsky and R. Fainstein (1977a), the number of chromosomes does not have a very influencing effect on the viability of the gametes, and it is rather their constitution and their compatibility that are the most important.

other and this correlation is influenced by the effect of the genotype. Thus, each morphological character is controlled by a single gene, but these genes are closely linked to each other (Ladizinsky, Fainstein, 1977a).

Selection

Derivative hybrids from the interspecific cross (*A. sativa* × *A. murphyi*) × *A. sativa* were subjected to field pedigree selection during eight years, starting from the F_2 generation to the F_8 generation. Among the thirty tested lines, ten achieved genetic stability and showed good resistance/tolerance to diseases, such as powdery mildew, *Helminthosporium*, crown rust, and barley yellow dwarf virus.

Assessment of agronomic performance

The ten selected lines were tested for agronomic performance during two years in the field (Fig. 4). The annual rainfall for the two growing seasons was 530 and 570 mm, respectively. Plant vigor of the assessed lines was similar or even superior to that of the hexaploid parent 'Amlal'. The height of hybrid plants exceeded that of their parent 'Amlal' (145 cm) by

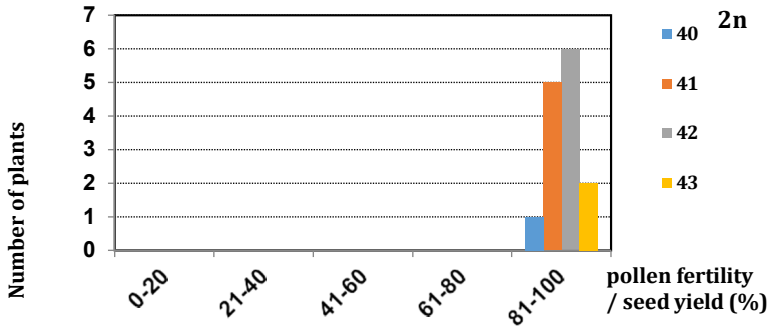


Fig. 2. Distribution of BC_1 plants from [*A. sativa* (cv. 'Amlal') × *A. murphyi* P45-55] × *A. sativa* by chromosome number and by classes of pollen fertility and seed yield per plant

Рис. 2. Распределение растений BC_1 от [*A. sativa* (cv. 'Amlal') × *A. murphyi* P45-55] × *A. sativa* по числу хромосом и по классам фертильности пыльцы и урожайности семян на растение

Morphological characterization of hybrid seeds

Morphological characterization of the backcrossed seeds showed the existence of great morphological variability within the hybrid seeds, due to the segregation of their morphological characters (Fig. 3). Analysis of the resulting quantitative variables using the independence χ^2 test highlighted the existence of a highly significant effect of the genotype on lemma hairiness ($\chi^2 = 73.75^{**}$) and awn vigor ($\chi^2 = 92.01^{**}$). As for the number of awns per spikelet, the genotype had a non-significant effect on this character ($\chi^2 = 12.55$ ns). In general, morphological characters are correlated with each

2 to 6 cm. The average grain yields of the hybrid lines over the two years were 34.8 q ha^{-1} and 35.10 q ha^{-1}, respectively. On average, the lines' grain yield by 3 to 12 q ha^{-1} exceeded that of the hexaploid parent 'Amlal' (31 q ha^{-1}). Therefore, the hybridization work allowed the derivative lines to have a grain yield gain of 9.68% to 38.7% (see Fig. 5). The average dry matter yields of the hybrid lines were 9.8 t DM/ha and 10.2 t DM/ha respectively, exceeding that of cv. 'Amlal' (10 t DM/ha) (Fig. 6). According to the obtained results, four hybrid lines, F09-01 (genotype A07-13), F09-02 (genotype A07-20), F09-03 (genotype A07-32), and F09-04 (genotype

Fig. 3. Morphological characterization of hybrid seeds' spikelets

Рис. 3. Морфологическая характеристика колосков гибридных зерен

Fig. 4. Assessment of agronomic performance of derivative hybrid lines in the field
Рис. 4. Оценка агрономических показателей гибридных линий в полевых условиях

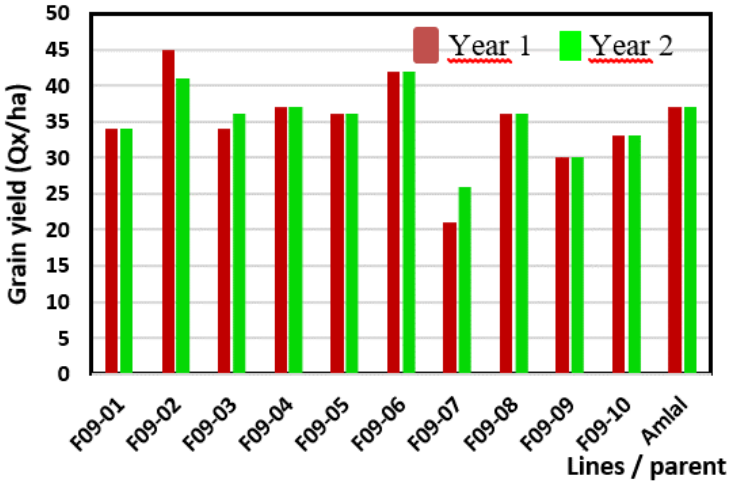


Fig. 5. Hybrid line grain yield assessed over two years at the Marchouch Experiment Station
Рис. 5. Урожайность зерна гибридных линий, оцененная за два года на Маршушской опытной станции

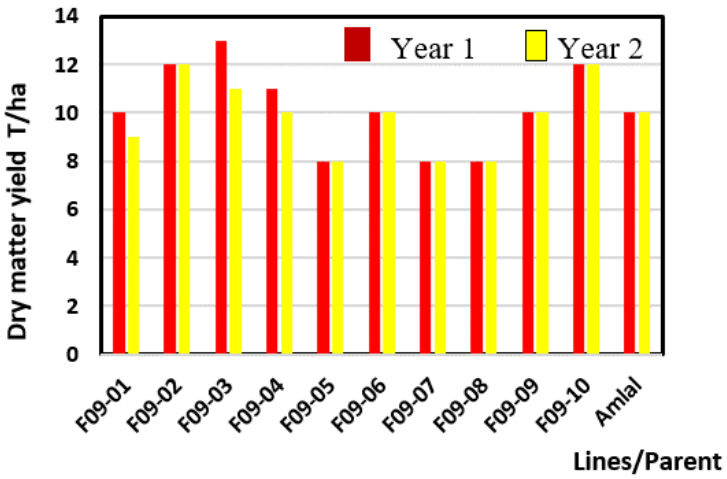


Fig. 6. Hybrid line dry matter yield assessed over two years at the Marchouch Experiment Station
Рис. 6. Урожайность сухой массы гибридных линий, оцененная за два года на Маршушской опытной станции

A07-36), were selected for further assessment for nutritional and technological quality traits.

Assessment of the hybrid lines' technological quality

Weight of one thousand seeds (WTS) of hybrid lines

The hybrid lines varied in WTS from 36 to 39 g, exceeding their hexaploid parent *A. sativa* cv. 'Amlal' (33.33 g) by 2 to 5 g. Thus, this trait was improved through interspecific crosses to the tetraploid parent *A. murphyi* (P45-55).

Groat and husk proportions in hybrid lines

Analysis of groat proportions for the hybrid lines revealed that it ranged from 68% to 74%, higher than that of both the tetraploid parent *A. murphyi* P45-55 (58%) and the hexaploid parent 'Amlal' (66%) (see Fig. 7). Husk proportions of the derived lines varied between 26% and 32%, lower than in both the tetraploid parent *A. murphyi* P45-55 (42%) and the hexaploid parent *A. sativa* cv. 'Amlal' (34%) (Fig. 7).

Line A07-13 delivered the most compelling improvement, raising groat recovery to 74%, about 12 percentage points above the cultivated parent 'Amlal' and 16 points above the wild donor *A. murphyi* P45-55, while A07-36 (70%) and A07-20 (68%) also outperformed the check at $P \leq 0.05$. Because groat percentage is a reliable proxy for milling yield (Doehlert et al., 1999; Hall et al., 2003), these gains translate directly into higher flour output and lower dehulling waste, showing that the backcross strategy retained the high-protein alleles of *A. murphyi,* yet eliminated its thick-hull penalty. The PPSD results show a clear milling-quality gain after one backcross: all BC_1 lines carry < 33% husk, while A07-13 combines the lowest husk (25.96%) with the highest groat (74.04%), outperforming both the donor P45-55 (42.39% husk; 57.61% groat) and the recurrent parent 'Amlal' (33.75%; 66.25%), with differences supported by $P = 0.0001$, CV ≤ 5.24 %, and LSD = 3.177 (Table 1). Higher groat percentage is a direct

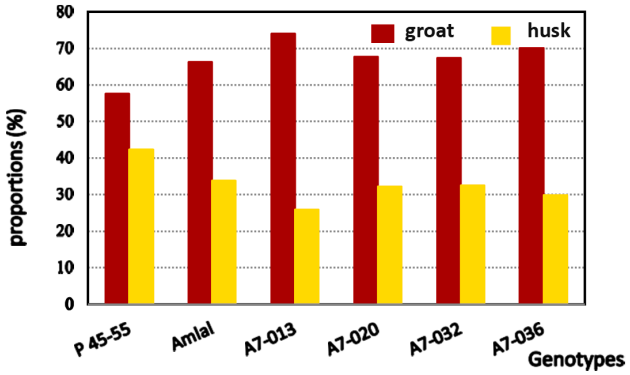


Fig. 7. Groat and husk proportions in the derivative lines of [*A. sativa* ('Amlal') × *A. murphyi* (P45-55)] × *A. sativa* ('Amlal')

Рис. 7. Соотношение зерна и пленок линий [*A. sativa* ('Amlal') × *A. murphyi* (P45-55)] × *A. sativa* ('Amlal')

Table 1. PPSD analysis for groat and husk proportions in the progeny of the cross [*A. sativa* ('Amlal') × *A. murphyi* (P45-55)] × *A. sativa* ('Amlal')

Таблица 1. Анализ PPSD для соотношения зерна и пленок у потомства скрещивания [*A. sativa* ('Amlal') × *A. murphyi* (P45-55)] × *A. sativa* ('Amlal')

Lines/parents	Groat %	Husk % /
A07-13	74.04 a	25.96 d
A07-20	67.80 bc	32.20 bc
A07-32	67.50 bc	32.50 bc
A07-36	70.08 b	29.92 c
Amlal	66.25 c	33.75 b
P45-55	57.61 d	42.39 a
ns	0.0001**	0.0001**
C.V (%)	2.71	5.24
LSD	3.177	3.177

Note: the means in a column sharing the same letter do not differ at $P \leq 0.05$ (Fisher's protected LSD); ** indicates significance at $P < 0.01$; CV is the coefficient of variation of the ANOVA residual

Примечание: средние значения в столбце, имеющие одну и ту же букву, не различаются при P ≤ 0,05 (НСР по критерию Фишера); ** указывает на значимость при P < 0,01; CV – коэффициент вариации остатка

proxy for milling/dehulling yield and an explicit breeding target in modern oat programs: recent work using multitrait genomic selection treats groat % as a core quality trait, because it predicts recoverable edible kernel and lowers processing losses (Ardayfio et al., 2025).

In parallel, genome-scale studies now map the loci for kernel and nutritional traits underpinning food-grade oats, supporting the feasibility of decoupling hull burden from end-use composition – consistent with the pattern observed here (Dhakal et al., 2024).

Groat protein content in hybrid lines

Groat protein content for the selected lines exceeded that of the hexaploid parent 'Amlal' (10.46%) by 1 to 7%. The highest protein content of 17.29% was recorded for line (F09-01) A07-13 (Fig. 8). Multiple comparison of PPSD means revealed the existence of a highly significant difference between the studied lines and their parents (0.0001**, $P < 0.05$). Thus, the hybridization work made possible a genetic gain from 12% to 65% in the progeny for this trait.

Combining all the above results, line A07-13 was selected for its good agronomic performance in addition to its nutritional features. This line was registered in the INRA–Morocco national catalogue under the name of cv. 'Al Fawze'. This cultivar was subjected to further nutritional quality tests and preliminary tests of rheological behavior. Adding different proportions of 'Al Fawze' flour to that of the widely used Moroccan cultivar of bread wheat 'Kenz' improved the nutritional quality of the produced bread. Protein content in the mixture of 30% of oat and 70% of bread wheat flours was increased by 14% and the dry matter content by 16.02%, compared to that of bread wheat flour from cv. 'Kenz'.

Incorporation of 30% of oat flour into 70% of bread wheat flour improved the β-glucan content of the mixture by up to 1.20%. On the other hand, both color and rheological behavior of the flour mixture were affected, acting particularly on the water absorption rate and paste stability (Fig. 10). Across wheat–oat blends with the use of 'Al Fawze', protein rose steadily with substitution (14.20% at 0% to 16.02% at

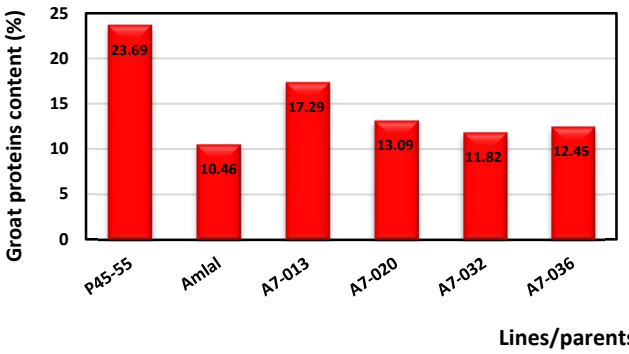


Fig. 8. **Groat protein content in the derivative lines of [*A. sativa* ('Amlal') × *A. murphyi* (P45-55)] × *A. sativa* ('Amlal')**

Рис. 8. Содержание белка в крупе линий от скрещивания [*A. sativa* ('Amlal') × *A. murphyi* (P45-55)] × *A. sativa* ('Amlal')

Groat ß-glucan content in hybrid lines

Analysis of the *ß*-glucan content in the groat of the selected lines showed that it ranged from 2.94 to 4.29%, realizing an improvement of this trait by 0.18 to 1.53% in comparison to the hexaploid parent 'Amlal' (2.76%). The highest rates were scored for lines A07-13 and A07-32: 4.29% and 4.1%, respectively (Fig. 9). Hence, through hybridization work, we were able to achieve a genetic gain of 2.44 to 54.28% in the derivative lines for groat *ß*-glucan content.

Nutritional quality and preliminary rheological behavior tests of flour mixtures

30% → 17.14% at 100%), and β-glucans increased sharply from 15 to 30% of the oat share (0.18 to 1.20 g/100 g), as expected for oat fortification. Gluten dilution lowered the sedimentation index with higher oat levels (34.00 at 0% to 17.67 at 30%), a well-documented effect in wheat–oat composites. Technologically, the best balance occurred at 20% of oat, where specific volume peaked (13.36 $cm^3\ g^{-1}$) and crumb density was minimal (0.075 g cm^{-3}); at 25–30%, nutritional gains continued but loaf structure started to decline. This pattern agrees with recent studies showing that moderate oat inclusion (≈ 10–20%), with proper water/yeast optimization,

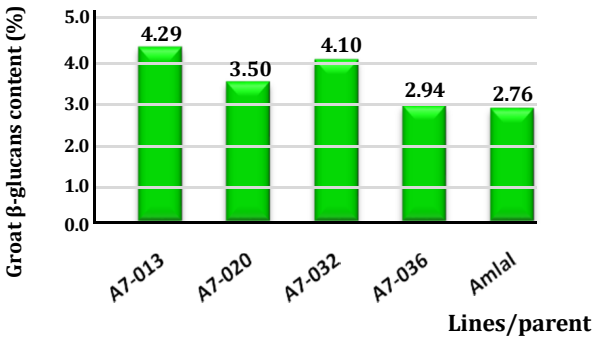


Fig. 9. **Groat *β*-glucan content in the derivative lines of [*A. sativa* ('Amlal') × *A. murphyi* (P45-55)] × *A. sativa* ('Amlal')**

Рис. 9. Содержание β-глюканов в крупе линий от скрещивания [*A. sativa* ('Amlal') × *A. murphyi* (P45-55)] × *A. sativa* ('Amlal')

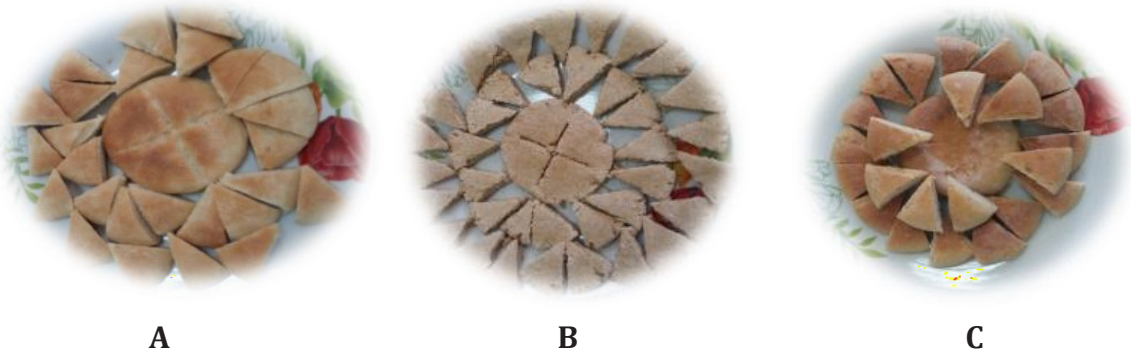


Fig. 10. Bread samples: A – baked from 100% 'Kenz' bread wheat flour; B – baked from 100% 'Al Fawze' oat flour; C – baked from a mixture of 'Kenz' (80%) and 'Al Fawze' (20%) flours

Рис. 10. Образцы хлеба, изготовленного из: А – 100% пшеничной муки сорта 'Kenz'; В –100% овсяной муки сорта 'Al Fawze'; С – мучной смеси сортов 'Kenz' (80%) и 'Al Fawze' (20%)

can retain or maximize loaf volume while boosting fiber, whereas higher levels typically reduce volume and increase firmness due to gluten dilution and *β*-glucan viscosity effects (Rashed et al., 2024). It markedly improved the nutritional quality without influencing too much the technological quality required by the bakery industries and recommended bread bakeries (Table 2).

(Fig. 11), meaning more saleable flour per ton of grain. Even more striking are the compositional gains: protein rises from 10% to 17% and 13%, while *β*-glucan content increases from 3% to 5% and 4%. These levels meet or exceed the thresholds associated with cholesterol-lowering and low-glycemic properties in human diets (Welch et al., 2000; Zhu et al., 2004) (see Table 3, 4).

Table 2. Physicochemical composition and bread-quality attributes of wheat breads incorporating different levels of 'Al Fawze' oat flour

Таблица 2. Физико-химический состав и качественные показатели пшеничного хлеба с различным содержанием овсяной муки сорта 'Al Fawze'

'Al Fawze' oat flour, %	Wheat flour, %	Protein, %	β-glucans, g/100 g	Sedimentation index	Specific volume, cm^3/g	Density, g/cm^3
0	100	14.20^{d}	0.12^{d}	34.00^{a}	–	–
10	90	14.85^{c}	0.10^{c}	20.67^{c}	–	–
15	85	15.19^{c}	0.18^{c}	22.33^{b}	11.04^{d}	0.090^{ab}
20	80	15.27^{c}	0.99^{cb}	20.67^{c}	13.36^{b}	0.075^{d}
25	75	15.93^{b}	1.19^{b}	19.33^{c}	–	–
30	70	16.02^{b}	1.20^{b}	17.67^{d}	11.72^{dc}	0.085^{abc}
100	0	17.14^{a}	4.04^{a}	12.33^{e}	12.08^{bcd}	0.082^{bcd}

Note: the means with different letters a, b, c, etc. indicate significant differences according to Duncan's test, $P \leq 0.05$

Примечание: средние значения с разными буквами a, b, c и др. указывают на значимые различия согласно тесту Дункана, $P \leq 0,05$

Cultivar registration in the official national register

'Al Fawze' and 'Abtah' outperform their parent 'Amlal' in every key trait shown in Tables 3 and 4. Grain yield rises by ≈10% in 'Al Fawze' and by > 35% in 'Abtah', confirming that the introgressed germplasm confers a genuine productivity advantage rather than a mere quality trade-off. Both retain full field resistance to crown rust and powdery mildew and show only moderate barley-yellow-dwarf symptoms, a disease-control profile that typically safeguards 15–20% of yield otherwise lost to infection (Saari, Prescott, 1975).

Technologically, thousand-kernel weight climbs from 32 g in 'Amlal' to 38 g and 34 g, a range associated with superior milling efficiency and reduced broken groats during dehulling (Doehlert et al., 1999; Hall et al., 2003). Groat recovery itself improves from 66% to 74% ('Al Fawze') and 68% ('Abtah')

Conclusion

Interspecific introgression from the endemic tetraploid *Avena murphyi* (P45-55) into hexaploid *A. sativa* ('Amlal') produced fertile backcross derivatives (72% hexaploid), in which pollen fertility correlated with grain yield ($P < 0.001$). After F_2–F_8 pedigree selection, ten stable lines combined higher field performance (mean 34.8–35.1 q ha^{-1} vs. 31 q ha^{-1} for 'Amlal') with robust disease profiles. Milling traits improved markedly: < 33% of husk and 68–74% of groat in all BC_1 lines, with A07-13 at 74.04% of groat / 25.96% of husk and TKW 36–39 g. Composition also advanced (groat protein up to 17.29%, *β*-glucans up to 4.29%). In bread prototypes, 20% of 'Al Fawze' flour maximized the specific volume (13.36 $cm^3\ g^{-1}$) and minimized the crumb density (0.075 g cm^{-3}), while in-

Fig. 11. Kernels of new released hexaploid *Avena sativa* cvs. 'Al Fawze' and 'Abtah'

Рис. 11. Зерновки новых выведенных гексаплоидных сортов *Avena sativa* 'Al Fawze' и 'Abtah'

Table 3. Agronomic traits of the registered cvs. 'Al Fawze' and 'Abtah' compared to their hexaploid parent 'Amlal'

Таблица 3. Хозяйственно ценные признаки зарегистрированных сортов 'Al Fawze' и 'Abtah' в сравнении с их гексаплоидным родителем – сортом 'Amlal'

Cultivars	Plant cycle	Disease resistance assessment				Grain yield, q ha^{-1}
		Crown rust	Powdery mildew	Helmintho-sporium	Barley yellow dwarf virus (BYDV)	
'Amlal'	Semi-early	Resistant	Moderately sensitive	Resistant	Moderately sensitive	31
'Al Fawze'	Semi-early	Resistant	Resistant	Moderately resistant	Resistant	34
'Abtah'	Semi-early	Resistant	Resistant	Moderately resistant	Resistant	43

Table 4. Selected technological parameters of the registered cvs. 'Al Fawze' and 'Abtah' compared to their hexaploid parent 'Amlal'

Таблица 4. Отдельные технологические параметры зарегистрированных сортов 'Al Fawze' и 'Abtah' в сравнении с их гексаплоидным родителем – сортом 'Amlal'

Cultivars	Selected technological parameters			
	Weight of 1000 seeds, g	Husk proportion, %	Groat protein content, %	Groat *β*-glucan content, %
'Amlal'	32.33 ± 1.35^{c}	66.25 ± 1.04^{c}	10.46 ± 0.03^{c}	2.76 ± 3.03^{c}
'Al Fawze'	38.20 ± 1.52^{a}	74.03 ± 0.15^{a}	17.29 ± 0.29^{a}	4.29 ± 0.03^{a}
'Abtah'	34.40 ± 0.03^{b}	67.80 ± 0.96^{b}	13.09 ± 0.40^{b}	3.50 ± 1.04^{b}

Note: the means with different letters a, b, c, etc. indicate significant differences according to Duncan's test, $P \leq 0.05$

Примечание: средние значения с разными буквами a, b, c и др. указывают на значимые различия согласно тесту Дункана, $P \leq 0,05$

creasing protein and *β*-glucans. On this basis, A07-13 ('Al Fawze') and A07-36 ('Abtah') were registered, delivering higher yield, groat recovery and nutritional value than 'Amlal'. The results broaden the genetic base of Moroccan oats and provide a practical route to food-grade, climate-adapted cultivars. Industrial scale-up of milling and baking trials is the next step.

Recommended fields of application

Oats have a rich and diverse composition of proteins, unsaturated fatty acids, fibers and antioxidants, such as polyphenols and tocopherols. This particular composition supplies this crop with beneficial properties that could be converted into antioxidant effects, preventing against diabetes, obesity, cancer, and cardiovascular diseases. In Morocco, however, oat

cultivation for human consumption has not yet been developed compared to that for animal feed. This research supported the release of new and original cultivars from Moroccan wild oat germplasm. The exploitation of new cultivars as beneficial food for human health opens up new prospects for both farmers and industrials (flourmills, biscuit factories, breakfast cereals, etc.).

High levels of quality parameters of these cultivars, derived from interspecific crosses, provide an optimistic tool for improving groat nutritional value, especially in regions of the world where deficiency of minerals and other major nutritional compounds affects populations. The existence of essential nutrients in the grain of the newly released cultivars can remedy the problems of malnutrition by acting as supplements in the daily diet, thus making it possible to cover our daily needs in proteins, soluble fibers, essential minerals, etc.

The results of this research showed for the first time the relevance and usefulness of combining both breeding work and technological assessment. It should be noted in this regard that the evaluation of essentially nutritional parameters, namely proteins and β-glucans in groat, was carried out for the first time in Morocco. The obtained results made it possible not only to distinguish oats from other cereals, but also to differentiate the new hexalpoid cultivars from those commonly produced in the world, as reported in the literature.

Furthermore, the results of this research could further encourage the use of oats in industrial preparations, where wheat holds exclusive rights. Moreover, the flour from the selected lines could be a source of valuable nutrients for human consumption and can therefore be used in the formulation of typical foods, nutritious and beneficial to health, of those commonly elaborated with wheat flour.

Thus, the development of new cultivars with high nutritional value, conceived for human consumption, can contribute to increasing the socio-economic impact of oat cultivation, mainly in North Africa where oats are still mainly used as fodder.

Estimation of socio-economic benefits

The demand for healthy and multifunctional products is increasing day after day with the societies' evolution and the awareness of everyone's well-being. In this context, we offer two new oat cultivars, already recognized for their beneficial effects on health, which also have even higher nutritional qualities. All oat trade value chain branches would benefit from this new developed material. Farmers could ensure good commercialization of their production due to the good grain yield and the excellent performance of the cultivars. The manufacturer could add value to its products by including oats in the recommended proportions. The consumer would gain from a quality product beneficial for his health, especially that the number of diabetics requiring a healthy and safe diet is rapidly increasing worldwide.

The adoption of these cultivars with good productivity and excellent agronomic, technological and nutritional performance by farmers will certainly ensure a good margin of profitability. Seed growers will also benefit from these cultivars, due to their grain quality and the guaranteed good yield levels, which will make up for the lack of certified seeds produced by the formal sector.

Morocco could even consider exporting seeds of these two cultivars to major oat consumer countries, because of their exceptionally good groat protein content, compared to that of other cultivars grown elsewhere and released without using wild germplasm available in our rich flora.

References / Литература

Al Faiz C. Sélection de nouvelles variétés d'avoine au Maroc. *Terre Marocaine*. 1990;115:8-13. [in French]

Al Faiz C., Chakroun M., Allagui M.B., Sbeita A. Fodder oats in the Maghreb. In: J.M. Suttie, S.G. Reynolds (eds). *Fodder Oats: A World Overview*. Rome: FAO; 2004. p.53-91.

Al Faiz C., Saidi S., Jaritz G. Avoine fourragère (*Avena sativa* L.). In: G. Jaritz, M. Bounejmate (eds). *Production et utilisation des cultures fourragères au Maroc*. Rabat: INRA; 1997. p.209-224. [in French]

Alrahmany R., Tsopmo A. Role of carbohydrases on the release of reducing sugar, total phenolics and on antioxidant properties of oat bran. *Food Chemistry*. 2012;132(1):413-418. DOI: 10.1016/j.foodchem.2011.11.014

Aoun M., Carter A.H., Morris C.F., Kiszonas A.M. Genetic architecture of end-use quality traits in soft white winter wheat. *BMC Genomics*. 2022;23(1):440. DOI: 10.1186/s12864-022-08676-5

Ardayfio N.K., Kinney C., Li D., Naraghi S.M., McMullen M.S., Fiedler J.D. Genome-wide association studies reveal genetic control of nutritional quality, milling traits, and agronomic characteristics in oat (*Avena sativa* L.). *Plant Genome*. 2025;18(3):e70060. DOI: 10.1002/tpg2.70060

Clamot G. Recherche sur l'amélioration de la teneur en protéine de l'avoine. In: *Seed Protein Improvement in Cereals and Grain Legumes: Proceedings of an International Symposium on Seed Protein Improvement in Cereals and Grain Legumes; September 4–8, 1978; Neuherberg, Federal Republic of Germany. Vol. II*. Vienna: IAEA/FAO; 1979. p.345-356. [in French]

Comeau A., Haber S. Breeding for resistance: The example of Barley Yellow Dwarf Virus. *Oat Newsletter*. 1986;37:98-99.

Doehlert D.C., McMullen M.S., Baumann R.R. Factors affecting groat percentage in oat. *Crop Science*. 1999;39(6):1858-1865. DOI: 10.2135/cropsci1999.3961858x

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. World food situation. FAO Cereal Supply and Demand Brief: [website]. Available from https://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/en [accessed May 12, 2025].

FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Food and Agriculture Data: [website]. Available from: https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL [accessed May 12, 2025].

Gomez K.A., Gomez A.A. Statistical procedures for agricultural research. 2nd ed. New York, NY: John Wiley and Sons; 1984.

Hall M.B., Tarr A.W., Karopoulos M. Using digital imaging to estimate groat percent and milling yield in oats. *Journal of Cereal Science*. 2003;37(3):343-348. DOI: 10.1006/jcrs.2002.0507

Harlan J.R. Crops and man. 2nd ed. Madison, WI: American Society of Agronomy and Crop Science Society of America; 1992.

International Seed Testing Association. International rules for seed testing. Bassersdorf: ISTA; 2018. DOI: 10.15258/istarules.2018.F

International Seed Testing Association. International rules for seed testing. *Seed Science and Technology*. 1985;13(2):299-513.

Jeger M.J., Viljanen-Rollinson S.L.H. The use of the area under the disease-progress curve (AUDPC) to assess quantitative disease resistance in crop cultivars. *Theoretical and Applied Genetics*. 2001;102(1):32-40. DOI: 10.1007/s001220051615

Ladizinsky G. New evidence on the origin of the hexaploid oats. *Evolution*. 1969;23(4):676-684. DOI: 10.1111/j.1558-5646.1969.tb03549.x

Ladizinsky G., Fainstein R. Introgression between the cultivated hexaploid oat *A. sativa* and the tetraploid wild oats *A. magna* and *A. murphyi*. *Canadian Journal of Genetics and Cytology*. 1977;19(1):59-66. DOI: 10.1139/g77-007

Ladizinsky G., Johnson B.L. Seed protein homologies and the evolution of polyploidy in *Avena*. *Canadian Journal of Genetics and Cytology*. 1972;14(4):875-888. DOI: 10.1139/g72-108

Leggett J.M. Classification and speciation in *Avena*. In: H.G. Marshall, M.E. Sorrells (eds.). *Oat Science and Technology*. Madison, WI: American Society of Agronomy; 1992. p.29-52.

Leggett J.M., Ladizinsky G., Hagberg P., Obanni M. The distribution of nine *Avena* species in Spain and Morocco. *Canadian Journal of Botany*. 1992;70(2):240-244. DOI: 10.1139/b92-033

Loskutov I.G. Influence of vernalization and photoperiod on the vegetation period of wild species of oats (*Avena* spp.). *Euphytica*. 2001a;117(2):125-131. DOI: 10.1023/A:1004073904939

Loskutov I.G. Interspecific crosses in the genus *Avena* L. *Russian Journal of Genetics*. 2001b;37(5):467-475. DOI: 10.1023/A:1016697812009

Loskutov I.G., Rines H.W. *Avena* L. In: C. Kole (ed.). *Wild Crop Relatives: Genomic and Breeding Resources*. Heidelberg; Berlin: Springer; 2011. p.109-184. DOI: 10.1007/978-3-642-14228-4_3

Manzali R., Bouksaim M., Douaik A., Ladizinsky G., Saidi N. Variation of some physical and chemical quality traits of Moroccan domesticated tetraploid oat lines of *Avena murphyi* Ladiz. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(1):128-136. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-1-128-136

Manzali R., El Antari A., Douaik A., Taghouti M., Benchekroun M., Bouksaim M. et al. Profiling of nutritional and health-related compounds in developed hexaploid oat lines derivative of interspecific crosses. *International Journal of Celiac Disease*. 2017;5(2):72-76. DOI: 10.12691/ijcd-5-2-6

Manzali R., Touil S., Douaik A., Aoussar N., Bouksaim M., Saidi N. Exploring extraction techniques for bioactive compounds and investigating antioxidant properties in Moroccan oat lines. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(1):177-190. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-1-177-190

Marshall G.N., Wortman C.B., Kusulas J.W., Hervig L.K., Vickers Jr. R.R. Distinguishing optimism from pessimism: Relations to fundamental dimensions of mood and personality. *Journal of Personality and Social Psychology*. 1992;62(6):1067-1074. DOI: 10.1037/0022-3514.62.6.1067

McCleary B.V., Charnock S.J., Rossiter P., O'Shea M.F., Power A.M., Lloyd R.M. Measurement of carbohydrates in grain, feed and food. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2006;86(11):1648-1661. DOI: 10.1002/jsfa.2497

Moser H.S., Frey K.J. Direct and correlated responses to three S_1-recurrent selection strategies for increasing protein yield in oat. *Euphytica*. 1994;78:123-132. DOI: 10.1007/BF00021407

Oelke E.A., Oplinger E.S., Teynor T.M., Putnam D.H., Doll J.D., Kelling K.A., Durgan B.R., Noetzel D.M. Safflower: Alternative field crop manual. Madison, WI: University of Wisconsin; 1992.

ONSSA. Bilan des activités de contrôle réalisées par l'ONSSA au titre de l'année 2019. Office National de Sécurité Sanitaire des Produits Alimentaires; 2020. Available from: https://www.agrimaroc.ma/onssa-operations-controle-2019 [accessed May 19, 2025]. [in French]

Peterson D.M., Mannerstedt Fogelfors B. Cultivation environment affects antioxidants, protein and oil content of oat genotypes differently. *Agrifood Research Reports*. 2004;51:239.

Rajhathy T., Sadasivaiah R.S. The cytogenetic status of *Avena magna*. *Canadian Journal of Genetics and Cytology*. 1969;11(1):77-85. DOI: 10.1139/g69-010

Rashed M.S., Pojić M., McDonagh C., Gallagher E., Frias J.M., Pathania S. Structure-function relationship of oat flour fractions when blended with wheat flour: Instrumental and nutritional quality characterization of resulting breads. *Journal of Food Science*. 2024;89(6):3347-3368. DOI: 10.1111/1750-3841.17089

Saari E.E., Prescott J.M. A scale for appraising the foliar intensity of wheat diseases. *Plant Disease Reporter*. 1975;59(5):377-380.

Saidi N. Amélioration de la teneur en protéines du grain des variétés marocaines d'avoine hexaploïde (*A. sativa*) par l'utilisation des espèces tétraploïdes sauvages (*A. magna* et *A. murphyi*) [dissertation]. Rabat: Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II; 2015. [in French]

Saidi N., Al Faiz C. Performance of the Quaker International Oat Nurseries under Moroccan ecological conditions. In: *Proceedings of the 8th International Oat Conference (IOC); University of Minnesota; June 28 – July 2, 2008*. Minneapolis, MN: University of Minnesota; 2008. Available from: https://graingenes.org//GG2/Avena/event/IOC2008/ [accessed May 05, 2025].

Saidi N., Hilali A., Shaimi N., Al Faiz C., Ladizinsky G. Assessment of groat nutritional aspects of newly developed hexaploid oat lines through interspecific crosses with the tetraploid oat *A. murphyi*. *Journal of General Engineering and Technology*. 2016;1(1):25-34.

Saidi N., Shaimi N., Idrissi A.S., Souihka A., Gaboun F., Al Faiz C. et al. Domestication of *Avena magna* Murphy & Terrell: a wild tetraploid oat species endemic to Morocco. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2020;181(1):84-92. DOI: 10.30901/2227-8834-2020-1-84-92

Saidi N., Touil S., Shaimi N., Douaik A., Ladizinsky G. Assessment of genotype × environment effect on groat protein and beta-glucan contents in a Moroccan collection of wild tetraploid oat species of *Avena magna* Murphy and Terrell and *A. murphyi* Ladiz. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2025;72(2):5139-5149. DOI: 10.1007/s10722-024-02247-1

Singh R.J. Plant cytogenetics. 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press; 2016. DOI: 10.1201/9781315374611

Stevens E.J., Armstrong K.W., Bezar H.J., Griffin W.B., Hampton J.G. Background to fodder oats worldwide. In: J.M. Suttie, S.G. Reynolds (eds). *Fodder Oats: A World Overview*. Rome: FAO; 2004. p.11-18.

Thomas H., Bhatti I.M. Notes on the cytogenetic structure of the cultivated oat *Avena sativa* (2n=6x=42). *Euphytica*. 1975;24:149-157. DOI: 10.1007/BF00147179

Thomas H., Haki J.M., Arangeb S. The introgression of characters of the wild oat *Avena magna* (2n=4x=28) into the cultivated oat *A. sativa* (2n=6x=42). *Euphytica*. 1980;2:391-399. DOI: 10.1007/bf00025138

Welch R.W., Brown J.C., Leggett J.M. Interspecific and intraspecific variation in grain and groat characteristics of wild oat (*Avena*) species: Very high groat (1→3)(1→4)-β-D-glucan in an *Avena atlantica* genotype. *Journal of Cereal Science*. 2000;31:273-279.

Zhu S., Rossnagel B.G., Kaeppler H.F. Genetic analysis of quantitative trait loci for groat protein and oil content in oat. *Crop Science*. 2004;44(1):254-260. DOI: 10.2135/cropsci2004.2540

Information about the authors

Nezha Saidi, PhD, National Institute for Agricultural Research, Regional Center for Agricultural Research of Rabat, INRA, Avenue Ennasr, Rabat 10000, Morocco, nezha.saidi@inra.ma, https://orcid.org/0000-0002-2665-3574

Naima Shaimi, PhD, National Institute for Agricultural Research, Regional Center for Agricultural Research of Rabat, INRA, Avenue Ennasr, Rabat 10000, Morocco, naima.shaimi@inra.ma, https://orcid.org/0000-0002-6133-6312

Mouna Taghouti, PhD, National Institute for Agricultural Research, Regional Center for Agricultural Research of Rabat, INRA, Avenue Ennasr, Rabat 10000, Morocco, mouna.taghouti@inra.ma, https://orcid.org/0000-0001-6721-2778

Aouatif Benali, PhD, National Institute for Agricultural Research, Regional Center for Agricultural Research of Rabat, INRA, Avenue Ennasr, Rabat 10000, Morocco, aouatif.benali@inra.ma, https://orcid.org/0000-0001-8111-5974

Rajae Manzali, PhD, Hassan I University, 50 Rue Ibnou Lhaytham, Settat 26002, Morocco, National Institute for Agricultural Research, Regional Center for Agricultural Research of Rabat, INRA, Avenue Ennasr, Rabat 10000, Morocco, raja.manz@live.fr, https://orcid.org/0000-0001-8746-1229

Salma Touil, Ibn Tofail University, Avenue de l'Université, Kénitra 14000, Morocco, National Institute for Agricultural Research, Regional Center for Agricultural Research of Rabat, INRA, Avenue Ennasr, Rabat 10000, Morocco, salmatouil1998@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-9306-0503

Ahmed Douaik, PhD, National Institute for Agricultural Research, Regional Center for Agricultural Research of Rabat, INRA, Avenue Ennasr, Rabat 10000, Morocco, ahmed.douaik@inra.ma, https://orcid.org/0000-0001-7374-4674

Fatima Gaboun, PhD, National Institute for Agricultural Research, Regional Center for Agricultural Research of Rabat, INRA, Avenue Ennasr, Rabat 10000, Morocco, fatima.gaboun@inra.ma, https://orcid.org/0000-0003-2018-8031

Mohamed Bouksaim, PhD, National Institute for Agricultural Research, Regional Center for Agricultural Research of Rabat, INRA, Avenue Ennasr, Rabat 10000, Morocco, mbouksaim@hotmail.com, https://orcid.org/0000-0002-2369-1284

Chawki Al Faiz, Ex Senior Scientist, National Institute for Agricultural Research, Regional Center for Agricultural Research of Rabat, INRA, Avenue Ennasr, Rabat 10000, Morocco, faizchawki@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-4954-2134

Gideon Ladizinsky, Professor, Ex Principal Investigator, United States Agency for International Development, Project No. TAMOU 97-053, Washington DC 20523, USA, ladizins@agri.huji.ac.il, https://orcid.org/0000-0001-5454-4095

Информация об авторах

Нежа Саиди, доктор философии, Национальный институт сельскохозяйственных исследований, Региональный центр сельскохозяйственных исследований Рабата, 10000 Марокко, Рабат, Авеню Эннаср, ИНРА, nezha.saidi@inra.ma, https://orcid.org/0000-0002-2665-3574

Наима Шайми, доктор философии, Национальный институт сельскохозяйственных исследований, Региональный центр сельскохозяйственных исследований Рабата, 10000 Марокко, Рабат, Авеню Эннаср, ИНРА, naima.shaimi@inra.ma, https://orcid.org/0000-0002-6133-6312

Муна Тагути, доктор философии, Национальный институт сельскохозяйственных исследований, Региональный центр сельскохозяйственных исследований Рабата, 10000 Марокко, Рабат, Авеню Эннаср, ИНРА, mouna.taghouti@inra.ma, https://orcid.org/0000-0001-6721-2778

Ауатиф Бенали, доктор философии, Национальный институт сельскохозяйственных исследований, Региональный центр сельскохозяйственных исследований Рабата, 10000 Марокко, Рабат, Авеню Эннаср, ИНРА, aouatif.benali@inra.ma, https://orcid.org/0000-0001-8111-59744

Радже Манзали, доктор философии, Университет Хасана I, 26003 Марокко, Сеттат, Рю Ибну Лхайтам, 50, Национальный институт сельскохозяйственных исследований, Региональный центр сельскохозяйственных исследований Рабата, 10000 Марокко, Рабат, Авеню Эннаср, ИНРА, raja.manz@live.fr, https://orcid.org/0000-0001-8746-1229

Сальма Туил, Университет Ибн Тофаила, 14000 Марокко, Кенитра, Авеню де л'Юниверсите, Национальный институт сельскохозяйственных исследований, Региональный центр сельскохозяйственных исследований Рабата, 10000 Марокко, Рабат, Авеню Эннаср, ИНРА, salmatouil1998@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-9306-0503

Ахмед Дуаик, доктор философии, Национальный институт сельскохозяйственных исследований, Региональный центр сельскохозяйственных исследований Рабата, 10000 Марокко, Рабат, Авеню Эннаср, ИНРА, ahmed.douaik@inra.ma, https://orcid.org/0000-0001-7374-4674

Фатима Габун, доктор философии, Национальный институт сельскохозяйственных исследований, Региональный центр сельскохозяйственных исследований Рабата, 10000 Марокко, Рабат, Авеню Эннаср, ИНРА, fatima.gaboun@inra.ma, https://orcid.org/0000-0003-2018-8031

Мохамед Буксаим, доктор философии, Национальный институт сельскохозяйственных исследований, Региональный центр сельскохозяйственных исследований Рабата, 10000 Марокко, Рабат, Авеню Эннаср, ИНРА, mbouksaim@hotmail.com, https://orcid.org/0000-0002-2369-1284

Шавки Аль Фаиз, бывший старший научный сотрудник, Национальный институт сельскохозяйственных исследований, Региональный центр сельскохозяйственных исследований Рабата, 10000 Марокко, Рабат, Авеню Эннаср, ИНРА, faizchawki@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-4954-2134

Гидеон Ладизинский, профессор, бывший главный исследователь, Агентство США по международному развитию, 20523 США, Вашингтон, округ Колумбия, проект № TAMOU 97-053, ladizins@agri.huji.ac.il, https://orcid.org/0000-0001-5454-4095

Contribution of the authors: Saidi N. – breeding program, including collecting, interspecific crosses, ploidy analysis, selection of parent forms; manuscript drafting. Shaimi N. – interspecific crosses; selection. Taghouti M., Benali A. –analysis of technological parameters. Manzali R., Touil S. – technological characterization of plant material. Douaik A., Gaboun F. – statistical analysis. Bouksaim M. – supervision of the technological study; manuscript revisions. Al Faiz C. – national supervision of the project; selection. Ladizinsky G. – international supervision of the project; supervision of collecting, interspecific crosses, and ploidy analysis.
Вклад авторов: Саиди Н. – селекционная программа, включая сбор, проведение межвидовых скрещиваний, анализ плоидности, выбор родительских форм; составление рукописи. Шайми Н. – проведение межвидовых скрещиваний; отбор. Тагути М., Бенали А. – анализ биохимических параметров. Манзали Р., Туил С. – биохимическая оценка растительного материала. Дуаик А., Габун Ф. – статистический анализ. Буксаим М. – руководство биохимическим исследованием; редактирование рукописи. Аль Фаиз Ш. – национальное руководство проектом; отбор. Ладизинский Г. – международное руководство проектом; руководство отбором, межвидовыми скрещиваниями и анализом плоидности.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.
Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

The article was submitted on 08.07.2025; approved after reviewing on 01.08.2025; accepted for publication on 02.09.2025.
Статья поступила в редакцию 08.07.2025; одобрена после рецензирования 01.08.2025; принята к публикации 02.09.2025.

ИММУНИТЕТ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 633.161:632
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-260-269

CC BY

Устойчивость образцов ячменя из Восточноазиатского центра разнообразия культуры к net- и spot-формам возбудителя сетчатой пятнистости

Н. М. Лашина[1], О. С. Афанасенко[1], И. Г. Лоскутов[2]

[1] *Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, Санкт-Петербург, Россия*

[2] *Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия*

Автор, ответственный за переписку: Нина Михайловна Лашина, nlashina@mail.ru

Актуальность. Ячмень – основная кормовая культура и ценное сырье для пивоваренной промышленности. Вредоносной болезнью ячменя является сетчатая пятнистость, вызываемая гемибиотрофным грибом *Pyrenophora teres* Drechsler, который существует в двух формах, различающихся по симптомам на ячмене: net-форма *P. teres* f. *teres* и spot-форма *P. teres* f. *maculata* Smed.-Pet. Расширение коллекции источников и доноров устойчивости для селекции является актуальной задачей.
Материалы и методы. Материалом для исследования послужила коллекция из 53 образцов ячменя из Восточноазиатского генцентра, отличающихся различным уровнем устойчивости к возбудителю сетчатой пятнистости. В исследовании использовали различные патотипы *P. teres* f. *teres* и *P. teres* f. *maculata*. Устойчивость проростков ячменя оценивали в контролируемых условиях климатической комнаты по международной 10-балльной шкале.
Результаты и выводы. Выявлено 18 образцов (30,2%) с расоспецифической устойчивостью к большинству патотипов *P. teres* f. *teres* (*Ptt*) и 14 образцов (26,4%) с устойчивостью к двум изолятам *P. teres* f. *maculata* (*Ptm*). У большинства образцов устойчивость к *Ptt* контролируется несколькими малыми генами. Устойчивостью к двум формам *Ptt* и *Ptm* отличались образцы к-3945, к-11011 и к-20497.

Ключевые слова: *Pyrenophora teres* f. *teres*, *P. teres* f. *maculata*, вирулентность, ювенильная устойчивость

Благодарности: исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 24-26-00072.
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Лашина Н.М., Афанасенко О.С., Лоскутов И.Г. Устойчивость образцов ячменя из Восточноазиатского центра разнообразия культуры к net- и spot-формам возбудителя сетчатой пятнистости. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(3):260-269. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-260-269

© Лашина Н.М., Афанасенко О.С., Лоскутов И.Г., 2025

IMMUNITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-260-269

Resistance of barley accessions from the East Asian Center of crop diversity to the net and spot forms of the net blotch pathogen

Nina M. Lashina[1], Olga S. Afanasenko[1], Igor G. Loskutov[2]

[1] *All-Russian Institute of Plant Protection, St. Petersburg, Russia*

[2] *N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia*

Corresponding author: Nina M. Lashina, nlashina@mail.ru

Background. Barley is a major fodder crop and valuable raw material for the brewing industry. A harmful disease of barley is net blotch, caused by the hemibiotrophic fungus *Pyrenophora teres* Drechsler, which exists in two forms that differ in symptoms on barley: the net form, *P. teres* f. *teres*, and the spot form, *P. teres* f. *maculata* Smed.-Pet. Thus, one of the crucial tasks is to expand the collection of resistance sources and donors for breeding.
Materials and methods. A set of 53 barley accessions from the East Asian Center of diversity, with various levels of resistance to *P. teres*, served as the material for the study. Different pathotypes of *P. teres* f. *teres* (*Ptt*) and *P. teres* f. *maculata* (*Ptm*) were employed. Barley seedlings were assessed for resistance under controlled laboratory conditions using the international 0–10 score scale.
Results and conclusions. Race-specific resistance to a majority of the studied *Ptt* pathotypes was ascertained for 18 barley accessions (30.2%), while 14 accessions proved resistant to two *Ptm* isolates (26.4%). In most accessions, resistance to *Ptt* is controlled by a few minor genes. Accessions k-3945, k-11011 and k-20497 were identified as resistant to both *Ptt* and *Ptm*.

Keywords: *Pyrenophora teres* f. *teres*, *P. teres* f. *maculata*, virulence, seedling resistance

Acknowledgements: the research was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 24-26-00072.
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Lashina N.M., Afanasenko O.S., Loskutov I.G. Resistance of barley accessions from the East Asian Center of crop diversity to the net and spot forms of the net blotch pathogen. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(3):260-269. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-260-269

Введение

Ячмень (*Hordeum vulgare* L.) является одной из наиболее важных зерновых культур. Как скороспелая, засухоустойчивая и солевыносливая культура ячмень возделывается практически во всех регионах страны, легко приспосабливаясь к контрастным условиям климата и разнообразию почв (Zlotina et al., 2013). Одним из факторов снижения урожая данной культуры является уязвимость ее к болезням. В связи с изменением климатических условий в сторону потепления увеличилась частота эпифитотий листостебельных болезней, в том числе сетчатой пятнистости ячменя. Возбудителем болезни является гриб *Pyrenophora teres* Drechsler, который существует в двух формах. Эти формы имеют одинаковую морфологию конидиального и сумчатого спороношения, но различаются по симптомам на растении-хозяине: net-форма (сетчатая) – *P. teres* f. *teres* (*Ptt*) и spot-форма (округлая) – *P. teres* f. *maculata* Smed.-Pet. (*Ptm*). Генетическая детерминация устойчивости ячменя к этим двум формам различна (Manninen et al., 2006; Grewal et al., 2008; McLean et al., 2009). Наибольшее распространение в России получила net-форма, однако после первого обнаружения *Ptm* в Краснодарском крае (Anisimova et al., 2011) есть основание предполагать ее дальнейшее распространение, так как во многих регионах мира эта форма превалирует в посевах ячменя (Liu et al., 2011; McLean et al., 2016). Потери урожая при поражении ячменя *Ptt* и *Ptm* составляют от 10 до 50%, вплоть до полной гибели сильно восприимчивых сортов при благоприятных для развития болезней условиях (Mathre, 1997; McLean et al., 2014; Clare et al., 2020).

Эпифитотии сетчатой пятнистости в Ленинградской области происходят с частотой один раз в 3–4 года (Afanasenko, 2010; Lashina, Afanasenko, 2019).

Для генетической защиты ячменя от этих патогенов необходимо обеспечить селекцию источниками и донорами устойчивости. Традиционно поиск эффективных источников устойчивости зерновых культур к болезням проводят среди образцов из центров генетического разнообразия. Н. И. Вавилов (Vavilov, 1926) определил одним из таких центров Юго-Восточную Азию. В этом регионе сосредоточено большое разнообразие шестирядных ячменей. Характерными чертами ячменей Восточноазиатского генцентра являются низкорослость, плотный укороченный колос, близкое к сферическому зерно, короткоостистость и безостость (Repko, 2015; Suchinina et al., 2016). Многие образцы из Японии и Китая заслуживают внимания своей скороспелостью, а ячмени Монголии выделяются устойчивостью к засухам (Lukyanova et al., 1990). Сочетание полезных хозяйственных качеств и устойчивости к болезням определяют ценность исходного материала для использования в селекции.

Целью данного исследования являлась характеристика ювенильной устойчивости к двум формам возбудителя сетчатой пятнистости образцов ячменя из Восточноазиатского центра генетического разнообразия культуры.

Материалы и методы

Растительный материал

Материалом для изучения послужили 53 образца ячменя из Восточноазиатского генцентра (Монголия, Китай и Япония), полученных из Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР). Среди изучаемых образцов ячменя только два (к-10931 и к-18267) являются двурядными, все остальные относятся к шестирядным.

Изоляты Pyrenophora teres f. *teres и P. teres* f. *maculata*

В исследовании использовали 8 моноконидиальных изолятов гриба *P. teres* f. *teres* (*Ptt*) и 2 – *P. teres* f. *maculata* (*Ptm*) различного географического происхождения, вирулентность которых изучалась на международном наборе сортов-дифференциаторов (табл. 1, 2). Моноконидиальные изоляты культивировали на модифицированной среде Чапека (ЧЛМ), содержащей KCl, $K_2H_2PO_4$, $MgSO_4$ по 0,5 г, мочевину – 1,2 г, лактозу – 20 г и агар-агар Kobe I (ROTH) – 17 г на 1 л дистиллированной воды, под УФ-лампами с 16-часовым фотопериодом при температуре 18–20°C в течение 10–14 дней.

Условия выращивания растений

Образцы ячменя высевали в контейнеры размером 18 × 13 × 6 см с обогащенным питательными веществами почвогрунтом Terra Vita® по 24 зерна каждого образца. В качестве контроля высевали в каждый контейнер восприимчивые сорта: шестирядный ‘Pirkka’ и двурядный ‘Harrington’, а также устойчивый шестирядный сорт ‘Canadian Lake Shore’. Экспериментальные растения культивировали в контролируемых условиях климатической комнаты Всероссийского научно-исследовательского института защиты растений (ВИЗР) в течение 10–14 дней при температуре 20–22°C и 16-часовом световом фотопериоде и там же проводили инокуляцию.

Инокуляция растений

В условиях лаборатории инокуляцию растений ячменя проводили в фазе двух-трех листьев путем опрыскивания суспензией моноконидиальных изолятов с помощью пульверизатора из расчета 0,2 мл на растение. Титр конидий в суспензии составлял 6000 на 1 мл. После инокуляции растения накрывали полиэтиленовыми пакетами и оставляли на 48 ч при температуре 20–22°C без света. Через двое суток инокулированные растения помещали на светоустановки, оснащенные светодиодными светильниками серии TL-FITO VR, с 16-часовым фотопериодом и поддерживали влажность воздуха 60–70%. Выращивали растения до проявления типичных для net- и spot-форм симптомов болезни. Эксперимент проводили в трех повторностях.

Учет типов реакции

Типы реакций проростков оценивали на втором листе через 10–12 дней после инокуляции по 10-балльной шкале A. Tekauz (1985), которая применима для обеих форм патогена (*Ptt* и *Ptm*), где значения от 1 до 3 баллов характеризовали высокую устойчивость образца (HR); баллы от 3,1 до 5,0 свидетельствовали о том, что образец среднеустойчив (MR); 5,1–6,9 – соответствовали слабой восприимчивости (MS); 7,0–10,0 – восприимчивости (S).

Результаты и обсуждение

Все моноконидиальные изоляты, использованные для оценки ювенильной устойчивости образцов ячменя к *Ptt* и *Ptm*, протестировали по вирулентности на международном наборе сортов-дифференциаторов (табл. 1, 2).

В таблице 3 приведены коэффициенты корреляции (r) вирулентности изолятов *Ptt* к исследуемому набору генотипов ячменя. Выявлена слабая положительная корреляция при сравнении типов реакций к изолятам *Ptt* в интервале от 0,16 между изолятами из России и Беларуси до 0,57 между изолятами из Чехии и Канады. Поло-

Таблица 1. Характеристика вирулентности изолятов *Pyrenophora teres* f. *teres* к набору из 9 сортов-дифференциаторов

Table 1. Virulence of *Pyrenophora teres* f. *teres* isolates to a set of 9 differentials

Генотип ячменя / Barley genotype	Тип реакции на заражение моноконидиальными изолятами *P. teres* f. *teres*, балл / Type of seedling response to infection with *P. teres* f. *teres* isolates, score							
	V_18 (Россия, Волосово / Volosovo, Russia)	Pr_2 (Россия, Дальний Восток / Russian Far East)	Ger_7 (Германия, Кведлинбург / Quedlinburg, Germany)	Chech_11 (Чехия, Лисице / Lysice, Czech Republic)	Can_11 (Канада, Альберта / Alberta, Canada)	SA_7 (Южная Африка, Бредасдорп / Bredasdorp, South Africa)	F_18 (Беларусь, Жодино / Zhodino, Belarus)	S_18 (Россия, Краснодар / Krasnodar, Russia)
'Harrington'	7,0	10,0	7,0	9,3	9,7	8,8	10,0	9,0
'Skiff'	8,8	10,0	8,5	10,0	7,0	10,0	10,0	10,0
'Prior'	7,8	4,5	7,3	3,8	6,0	5,8	3,0	3,5
C.I. 9825	2,1	8,7	5,3	6,8	5,3	7,0	3,5	4,5
'Harbin' *qPttCLS*	2,1	4,3	7,0	1,8	2,5	2,3	3,0	5,5
к-20019	2,5	2,5	3,0	3,3	5,0	4,6	3,5	5,0
C.I. 5791 6H *RPt5*	5,0	3,0	2,3	2,5	2,0	1,8	2,0	1,5
'Canadian Lake Shore' *qPttCLS*	3,3	3,2	5,5	1,3	2,5	2,3	1,0	4,5
к-8755 3HL	3,3	4,5	5,5	2,7	2,3	2,4	3,0	5,5

Таблица 2. Характеристика вирулентности изолятов *Pyrenophora teres* f. *maculata* Smed.-Pet.

Table 2. Virulence of *Pyrenophora teres* f. *maculata* Smed.-Pet. isolates

Моноконидиальный изолят / Single-conidium isolate	Происхождение изолята / Origin of the isolate	Тип реакции на заражение изолятами *P. teres* f. *maculata* на сортах-дифференциаторах, балл / Type of seedling response to infection with *P. teres* f. *maculata* isolates in a set of differentials, score										
		'Corvette'	'Beecher'	'Harrington'	'Skiff'	'Prior'	C.I. 9825	'Harbin'	к-20019	C.I. 5791	'Canadian Lake Shore'	к-8755
11.3	Беларусь, сорт ячменя 'Kangoo'	3,1	8,5	6,5	7,5	7,6	2,1	7,5	5,5	1,5	5,4	4,3
48.2	Россия, сорт ячменя 'Escape'	5,1	7,2	7,5	6,2	5,2	1,2	6,1	8,2	3,0	2,0	3,1

жительная корреляция (r = 0,39) отмечена и при сравнении типов реакции к изолятам *Ptm*. Отсутствовала корреляция между средними значениями вирулентности изолятов *Ptt* и *Ptm* (r = 0,005).

На рисунке показано распределение генотипов ячменя по устойчивости к изолятам *Ptt*. Наибольшее число среднеустойчивых генотипов ячменя (49,1% от числа изученных) выделилось при заражении изолятом из Беларуси (F_18) и 34,1% – при заражении изолятом Can_11 из Канады. Число высокоустойчивых образцов к каждому изученному изоляту *Ptt* превысило 10%, наибольшее количество устойчивых образцов ячменя (24,5%) выделилось при заражении растений изолятом из Ленинградской области (V_18).

Таблица 3. **Корреляция (r) вирулентности изолятов *Pyrenophora teres* f. *teres* к набору из 53 генотипов ячменя**
Table 3. **Virulence correlation values for *Pyrenophora teres* f. *teres* isolates in a set of 53 barley genotypes**

Сравниваемые изоляты *P. teres* f. *teres*	V_18	Pr_2	Ger_7	Chech_11	Can_11	SA_7	F_18
Pr_2	0,52						
Ger_7	0,40	0,38					
Chech_11	0,51	0,44	0,32				
Can_11	0,48	0,53	0,48	0,57			
SA_7	0,26	0,43	0,37	0,44	0,31		
F_18	0,16	0,43	0,37	0,42	0,51	0,51	
S_18	0,38	0,37	0,34	0,39	0,37	0,39	0,34

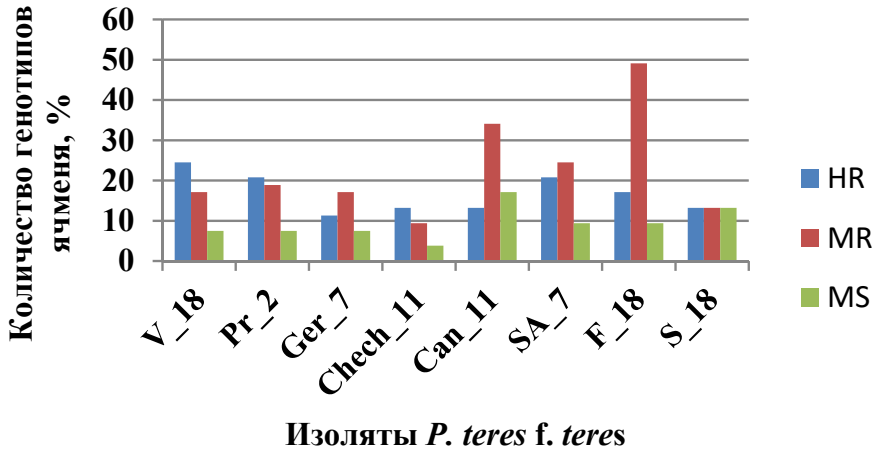


Рисунок. **Распределение по устойчивости к изолятам *Pyrenophora teres* f. *teres* генотипов ячменя из Восточноазиатского генцентра на стадии проростков: HR – высокоустойчивые генотипы; MR – среднеустойчивые генотипы; MS – средневосприимчивые генотипы**

Figure. **Frequency distribution of responses to inoculations with *Pyrenophora teres* f. *teres* isolates in seedlings of barley genotypes from the East Asian Center of diversity: HR – highly resistant genotypes; MR – moderately resistant genotypes; MS – moderately susceptible genotypes**

Данные по устойчивости проростков к возбудителю сетчатой пятнистости, как к net-, так и spot-форме, представлены в таблице 4. Среди 53 образцов ячменя 7 оказались восприимчивыми ко всем изученным изолятам *Ptt*. К двум изолятам *Ptm* восприимчивостью отличались 23 образца ячменя. Остальные обладали расоспецифической устойчивостью. Восприимчивыми ко всем изолятам *Ptt* оказались 4 образца: к-11653, к-15849, к-17819, к-30353, однако к изоляту из Беларуси (F_18) они показали тип реакции «5». Данные четыре образца мы отнесли к классу восприимчивых. Образцы к-3945, к-11011 и к-20497 устойчивы к семи изолятам *Ptt*, но к одному изоляту показали тип реакции 5 баллов, что соответствовало средней устойчивости. Образцы к-2959 и к-15811 устойчивы к семи изолятам *Ptt*, но восприимчивы к одному, поэтому охарактеризованы как устойчивые. Устойчивостью к большинству изолятов *Ptt* отличались также образцы к-11162, к-15812, к-17820, к-18269 и к-21472.

14 образцов ячменя были устойчивы к двум изолятам *Ptm* (см. табл. 4).

Изолят из Германии Ger_7 был вирулентен к сортам-дифференциаторам ‘Canadian Lack Shore’ и ‘Harbin’, устойчивость которых детерминирована геном *qPttCLS* на коротком плече хромосомы ячменя 3H (Dinglasan et al., 2019; Afanasenko et al., 2022). Следовательно, можно предположить, что промежуточный тип реакции к этому изоляту у образца ячменя к-15812, устойчивого к остальным изолятам, свидетельствует о наличии данного гена. Реакция восприимчивости этого образца также к изоляту S_18 может свидетельствовать о наличии у него еще одного гена на длинном плече хромосомы 3H, так как сорт-дифференциатор к-8755, носитель этого гена, проявил реакцию восприимчивости только к изолятам Ger_7 и S_18. По нашим данным, вирулентность к образцу к-8755 в популяциях *Ptt* встречается редко (Mironenko et al., 2016; Novakazi et al., 2019). По данным GWAS (Novakazi et al., 2019), SNP-гаплотипы выделившихся образцов ячменя ассоциированы с локусами устойчивости 6H-2 (52–52,3 cM) и 6H-3 (54,0 cM) на хромосоме 6H, 3H-1 (47–49 cM) и 3H-2 (52–54,2 cM) на хромосоме 3H и на хромосоме 7H (1,0 cM) (табл. 5).

Таблица 4. **Результаты оценки ювенильной устойчивости образцов ячменя из Восточноазиатского генетического центра к net- и spot- формам возбудителя сетчатой пятнистости**

Table 4. **Results of assessing seedling resistance in barley accessions from the East Asian Center of crop diversity to the net and spot forms of the net blotch pathogen**

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Происхождение / Origin	Тип реакции на заражение изолятами, балл / Type of seedling response to infection with isolates, score									
		Pyrenophora teres f. *teres*								*Pyrenophora teres* f. *maculata*	
		V_18	Pr_2	Ger_7	Chech_11	Can_11	SA_7	F_18	S_18	11.3	48.2
2959	Монголия	2,1	2,3	4,0	7,1	4,0	2,0	4,0	4,0	8,2	4,0
3904	—»—	7,4	8,0	9,2	8,0	7,0	7,2	4,1	8,2	8,3	2,2
3917	—»—	7,2	9,1	8,1	8,3	8,3	7,1	6,2	6,4	6,3	3,1
3952	—»—	8,4	7,2	8,0	7,3	8,4	3.1	5,1	9,3	6,3	6,1
4059	—»—	7,0	7,1	4,0	7,2	5,0	5,1	7,1	7,2	6,1	3,0
4070	—»—	7,0	7,3	5,1	9,2	7,3	4,0	7,2	7,1	5,1	5,0
4071	—»—	8,4	10,0	8,2	8,1	7,3	6,1	4,0	8,2	2,0	4,1
3945	Китай	2,1	4,1	4,0	3,2	5,0	3,0	3,1	3,0	5,1	3,2
11653	—»—	7,2	6,2	7,0	9,2	6,3	8,3	5,0	7,1	6,0	5,0
12291	—»—	8,1	7,2	6,0	7,3	8,2	7,0	9,3	7,2	5,0	5,1
15811	—»—	2,2	4,0	2,1	1,3	2,0	4,1	2,0	6,1	6,3	7,1
15812	—»—	2,1	3,4	5,0	2,2	2,1	4,0	2,1	5,2	6,4	3,1
15823	—»—	6,3	9,2	8,0	9,0	9,3	2,0	6,3	9,1	7,2	5,0
15849	—»—	7,1	7,0	6,0	8,1	8,1	9,2	5,0	8,3	4,1	6,2
16114	—»—	8,2	7,0	8,2	7,3	4,1	4,0	4,1	7,4	4,0	3,1
16134	—»—	4,0	7,0	8,1	9,4	6,1	7,1	7,3	5,0	4,0	4,1
16164	—»—	3,1	1,2	7,3	8,1	3,2	7,3	4,0	7,2	5,0	5,2
16165	—»—	7,2	4,0	7,2	4,1	6,3	8,4	5,0	8,1	2,0	2,1
16293	—»—	7,3	7,0	7,0	5,2	4,0	4,1	5,0	6,1	3,2	5,0
16320	—»—	7,1	8,2	9,1	7,0	7,0	7,3	4,1	8,2	6,2	7,3
16340	—»—	4,0	4,1	8,3	7,0	6,2	5,0	6,2	6,3	4,1	7,0
17819	—»—	7,1	7,3	9,0	8,1	6,1	6,0	5,0	9,2	5,0	5,1
17820	—»—	4,0	4,2	9,3	5,0	5,1	2,1	4,2	5,0	7,0	6,3
18267*	—»—	8,2	8,0	10	7,1	9,3	10	10	7,1	6,2	4,0
18268	—»—	2,1	2,2	7,1	2,0	1,2	4,0	5,1	8,2	7,1	5,0
18269	—»—	3,0	4,1	7,0	2,1	4,1	5,0	6,2	5,0	6,2	4,0
18523b	—»—	6,2	6,3	3,0	8,1	7,0	8,1	7,1	9,2	6,0	5,0
18973	—»—	8,1	9,2	7,0	7,1	6,0	7,0	7,2	9,4	2,0	3,1

Таблица 4. Окончание
Table 4. The end

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Происхождение / Origin	Тип реакции на заражение изолятами, балл / Type of seedling response to infection with isolates, score									
		Pyrenophora teres f. *teres*								*Pyrenophora teres* f. *maculata*	
		V_18	Pr_2	Ger_7	Chech_11	Can_11	SA_7	F_18	S_18	11.3	48.2
10161	Япония	6,2	7,1	9,0	8,2	6,2	8,2	9,1	8,3	6,3	7,1
10931*	—»—	7,3	8,3	9,0	10	7,1	9,1	4,2	7,0	7,2	5,0
10975	—»—	6,1	8,0	9,1	9,1	7,2	10	9,0	10	7,4	6,0
10984	—»—	8,3	8,0	7,2	10	3,0	10	7,1	9,1	5,1	5,0
11011	—»—	2,0	4,1	2,0	5,0	4,1	4,1	3,0	2,0	3,0	2,2
11025	—»—	5,1	7,3	7,0	6,3	4,0	6,0	4,2	5,0	3,0	2,1
11031	—»—	8,1	7,1	7,0	9,2	7,2	7,2	5,0	1,2	3,1	2,0
11139	—»—	8,4	3,0	7,2	7,2	4,1	8,0	2,1	7,1	4,3	2,0
11162	—»—	1,2	3,2	2,1	7,1	1,2	7,2	4,0	7,1	4,1	2,2
11169	—»—	2,0	8,3	7,3	6,0	4,0	8,0	9,1	2,1	2,1	5,0
11188	—»—	5,0	8,1	6,0	7,2	5,0	7,2	5,0	9,0	5,0	5,1
11189	—»—	5,0	4,0	2,2	7,2	4,2	7,2	4,1	6,1	5,3	5,0
11198b	—»—	8,2	6,2	7,0	7,1	4,0	5,1	5,0	6,0	5,0	6,2
11210	—»—	7,3	7,0	7,1	9,3	7,2	7,0	10	8,1	5,0	5,3
19275	—»—	3,0	7,2	8,1	4,0	6,1	6,2	4,1	7,2	6,0	6,2
20249	—»—	7,1	2,2	5,0	7,1	4,3	1,1	3,2	3,0	2,1	2,2
20277a	—»—	5,0	2,0	5,0	8,0	7,3	3,2	5,0	8,2	3,1	5,0
20277b	—»—	9,3	8,0	2,0	7,2	4,0	1,0	2,2	7,1	5,1	2,2
20333	—»—	4,0	4,0	7,3	7,1	7,0	5,0	6,3	5,0	6,1	5,0
20497	—»—	3,1	5,0	4,2	2,0	1,2	1,2	3,0	3,1	2,1	2,0
21413	—»—	1,2	2,1	5,0	7,0	6,3	2,0	5,0	6,3	2,0	3,2
21462	—»—	9,3	3,0	10	8,2	5,1	5,0	4,0	8,1	7,2	5,0
21472	—»—	8,1	2,0	6,1	3,2	4,0	2,2	2,1	3,0	2,1	5,0
22093	—»—	5,1	6,3	8,2	7,1	7,2	6,2	9,3	10	2,2	3,1
30353	—»—	7,0	8,2	8,0	7,0	7,0	7,2	5,0	9	4,0	5,0
Контроли:	‘Pirkka’	9,0	10	6,0	8,1	9,2	10	9,0	10	5,0	7,1
	‘Harrinton’	7,0	10	7,0	9,3	10	8,8	10	9,0	6,5	7,5
	‘Canadian Lake Shore’	3,3	3,2	5,5	1,3	2,5	2,3	1,0	4,5	5,4	2,0
	‘Harbin’	2,1	4,3	7,0	1,8	2,5	2,3	3,0	5,5	7,5	6,1

Примечание: * – двурядный ячмень
Note: * – two-row barley

Таблица 5. Локализация QTL, ассоциированных с устойчивостью к *Pyrenophora teres* f. *teres* у образцов ячменя
(по данным GWAS, Novakazi et al., 2019)

Table 5. Localization of resistance-associated QTLs for *Pyrenophora teres* f. *teres* in barley accessions
(based on GWAS data, Novakazi et al., 2019)

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Средний балл устойчивости к 8 изолятам *P. teres* f. *teres* / Mean score of resistance to 8 isolates of *P. teres* f. *teres*	Устойчивость детерминирована QTL на хромосомах ячменя / Resistance determined by QTLs on barley chromosomes
2959	3,6	6H-2, 6H-3, 3H-1
3945	3,4	6H-2, 6H-3, 3H-1
11011	3,3	6H-2, 6H-3, 3H-1
11162	4,0	6H-2, 6H-3, 3H-1
11189	4,9	6H-2, 6H-3, 3H-1
15811	2,9	6H-2, 6H-3, 3H-1, 3H-2
15812	3,1	6H-2, 6H-3
16164	5,0	6H-3, 3H-1
17820	4,8	6H-2, 6H-3, 3H-1, 3H-2, 7H
18268	3,9	6H-2, 6H-3, 3H-1
18269	4,5	6H-2, 6H-3, 3H-1, 3H-2
20249	4,0	6H-2, 6H-3, 3H-1
20277b	5,0	6H-2
20497	2,8	6H-2, 6H-3, 3H-1
21413	4,3	6H-2, 6H-3, 3H-1
21472	3,8	6H-2, 6H-3, 3H-1, 7H
Контроль устойчивости:		
‘Canadian Lack Shore’	3,0	3H-1, 3H-2
‘Harbin’	3,3	3H-1, 3H-2
Контроль восприимчивости:		
‘Pirkka’	9,0	–
‘Harrinton’	8,9	–

Заключение

Таким образом, среди изученных 53 образцов из Восточноазиатского генцентра выявлено 16 образцов (30,2%) с расоспецифической устойчивостью к *Ptt* и 14 образцов с устойчивостью к *Ptm* (26,4%).

Устойчивостью к обеим формам *P. teres* f. *teres* и *P. teres* f. *maculata* отличались образцы к-3945, к-11011 и к-20497, которые могут представлять интерес для селекции ячменя на устойчивость к двум формам сетчатой пятнистости.

References / Литература

Afanasenko O., Rozanova I., Gofman A., Lashina N., Novakazi F., Mironenko N. et al. Validation of molecular markers of barley net blotch resistance loci on chromosome 3H for marker-assisted selection. *Agriculture*. 2022;12(4):439. DOI: 10.3390/agriculture12040439

Afanasenko O.S. Problems to create grades of agricultural crops with long stability to diseases. *Plant Protection and Quarantine Journal*. 2010;(3):4-9. [in Russian] (Афанасенко О.С. Проблемы создания сортов сельскохозяйственных культур с длительной устойчивостью к болезням. *Защита и карантин растений*. 2010;(3):4-9).

Anisimova A.V., Mironenko N.V., Levshtanov S.A. The first find of *Pyrenophora teres* f. *maculata* in Krasnodar Territory. *Plant Protection News*. 2011;(3):53-56. [in Russian] (Анисимова А.В., Мироненко Н.В., Левштанов С.А. Первая находка гриба *Pyrenophora teres* f. *maculata* в Краснодарском крае. *Вестник защиты растений*. 2011;(3):53-56).

Clare S.J., Wyatt N.A., Brueggeman R.S., Friesen T.L. Research advances in the *Pyrenophora teres*–barley interaction. *Molecular Plant Pathology*. 2020;21(2):272-288. DOI: 10.1111/mpp.12896

Dinglasan E., Hickey L., Ziems L., Fowler R., Anisimova A., Baranova O. et al. Genetic characterization of resistance to

Pyrenophora teres f. *teres* in the international barley differential Canadian Lake Shore. *Frontiers in Plant Science*. 2019;10:326. DOI: 10.3389/fpls.2019.00326

Grewal T.S., Rossnagel B.G., Pozniak C.J., Scoles G.J. Mapping quantitative trait loci associated with barley net blotch resistance. *Theoretical and Applied Genetics*. 2008;116(4):529-539. DOI: 10.1007/s00122-007-0688-9

Lashina N.M., Afanasenko O.S. Susceptibility to leaf blights of commercial barley cultivars in North-Western Region of Russia. *Plant Protection News*. 2019;2(100):23-28. [in Russian] (Лашина Н.М., Афанасенко О.С. Поражаемость пятнистостями сортов ячменя, включенных в государственный реестр селекционных достижений и находящихся на сортоиспытаниях в условиях Северо-Запада Российской Федерации. *Вестник защиты растений*. 2019;2(100):23-28). DOI: 10.31993/2308-6459-2019-2(100)-23-28

Liu Z., Ellwood S.R., Oliver R.P., Friesen T.L. *Pyrenophora teres*: profile of an increasingly damaging barley pathogen. *Molecular Plant Pathology*. 2011;12(1):1-19. DOI: 10.1111/j.1364-3703.2010.00649.x

Lukyanova M.V., Trofimovskaya A.Y., Gudkova G.N., Terentieva I.A., Yarosh N.P. Flora of cultivated plants. Vol. 2 (Pt 2). Barley (Yachmen). V.D. Kobylyansky, M.V. Lukyanova (eds). Leningrad: Agropromizdat; 1990. [in Russian] (Лукьянова М.В., Трофимовская А.Я., Гудкова Г.Н., Терентьева И.А., Ярош Н.П. Культурная флора СССР. Т. 2 (ч. 2). Ячмень / под ред. В.Д. Кобылянского, М.В. Лукьяновой. Ленинград: Агропромиздат; 1990).

Manninen O.M., Jalli M., Kalendar R., Schulman A., Afanasenko O.S., Robinson J. Mapping of major spot-type and net-type net-blotch resistance genes in the Ethiopian barley line CI 9819. *Genome*. 2006;49(12):1564-1571. DOI: 10.1139/G06-119

Mathre D.E. (ed.). Compendium of barley diseases, 2nd ed. St. Paul, MN: American Phytopathological Society; 1997.

McLean M.S., Howlett B.J., Hollaway G.J. Epidemiology and control of spot form of net blotch (*Pyrenophora teres* f. *maculata*) of barley: a review. *Crop and Pasture Science.* 2009;60(4):303-315. DOI: 10.1071/CP08173

McLean M.S., Martin A., Gupta S., Sutherland M.W., Hollaway G.J., Platz G.J. Validation of a new spot form of net blotch differential set and evidence for hybridisation between the spot and net forms of net blotch in Australia. *Australasian Plant Pathology*. 2014;43(3):223-233. DOI: 10.1007/s13313-014-1285-8

McLean M.S., Weppler R., Howlett B.J., Hollaway G.J. Spot form of net blotch suppression and yield of barley in response to fungicide application in the Wimmera region of Victoria, Australia. *Australasian Plant Pathology*. 2016;45(1):37-43. DOI: 10.1007/s13313-015-0387-y

Mironenko N.V., Anisimova A.V., Baranova O.A., Zubkovich A.A., Afanasenko O.S. Species composition and structure on mating-type loci and virulence of *Pyrenophora teres* populations in the North-West region of Russia and Belarus. *Mycology and Phytopathology*. 2016;50(3):185-194. [in Russian] (Мироненко Н.В., Анисимова А.В., Баранова О.А., Зубкович А.А., Афанасенко О.С. Внутривидовой состав и структура популяций *Pyrenophora teres* в Северо-Западном регионе России и Беларуси по вирулентности и локусам типа спаривания. *Микология и фитопатология*. 2016;50(3):185-194).

Novakazi F., Afanasenko O., Anisimova A., Platz G.J.,·Snowdon R., Kovaleva O. et al. Genetic analysis of a worldwide barley collection for resistance to net form of net blotch disease (*Pyrenophora teres* f. *teres*). *Theoretical and Applied Genetics*. 2019;132(9):2633-2650. DOI: 10.1007/s00122-019-03378-1

Repko N.V. Winter barley breeding for high productivity and winter hardiness under the conditions of North Caucasus (Selektsiya ozimogo yachmenya na vysokuyu produktivnost i zimostoykost v usloviyakh Severnogo Kavkaza) [dissertation]. Krasnodar: Kuban State Agrarian University; 2015. [in Russian] (Репко Н.В. Селекция озимого ячменя на высокую продуктивность и зимостойкость в условиях Северного Кавказа: дис. ... докт. с.-х. наук. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет; 2015).

Suchinina K.V., Repko N.V., Kovalev V.V. The botanical classification of barley and its uses in breeding of the new varieties. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i razrabotki = Modern Scientific Research and Developments*. 2016;6(6):105-108. [in Russian] (Сухинина К.В., Репко Н.В., Ковалёв В.В. Ботаническая классификация ячменя и ее использование в селекции новых сортов. *Современные научные исследования и разработки*. 2016;6(6):105-108).

Tekauz A. A numerical scale to classify reactions of barley to *Pyrenophora teres*. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 1985;7(2):181-183. DOI: 10.1080/07060668509501499

Vavilov N.I. Studies on the origin of cultivated plants. Leningrad: Guttenberg Printing House; 1926. [in Russian] (Вавилов Н.И. Центры происхождения культурных растений. Ленинград: Типография им. Гуттенберга; 1926).

Zlotina M.M., Kovaleva O.N., Loskutov I.G., Potokina E.K. Use of allele-specific markers of the *Ppd* and *Vrn* genes for predicting growing season duration in barley cultivars. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2013;17(1):50-62. [in Russian] (Злотина М.М, Ковалева О.Н., Лоскутов И.Г., Потокина Е.К. Использование аллель-специфичных маркеров генов *Ppd* и *Vrn* для прогнозирования продолжительности вегетационного периода сортов ячменя. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2013;17(1):50-62).

Информация об авторах

Нина Михайловна Лашина, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, 196608 Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, ш. Подбельского, 3, nlashina@mail.ru, https://orcid/0000-0003-1419-7134

Ольга Сильвестровна Афанасенко, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, 196608 Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, ш. Подбельского, 3, olga.s.afan@gmail.com, https://orcid/0000-0001-7368-0797

Игорь Градиславович Лоскутов, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, i.loskutov@vir.nw.ru, https://orcid/0000-0002-9250-7225

Information about the authors

Nina M. Lashina, Cand. Sci. (Biology), Researcher, All-Russian Research Institute of Plant Protection, 3 Podbelskogo Hwy., Pushkin, St. Petersburg 196608, Russia, nlashina@mail.ru, https://orcid/0000-0003-1419-7134

Olga S. Afanasenko, Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, All-Russian Research Institute of Plant Protection, 3 Podbelskogo Hwy., Pushkin, St. Petersburg 196608, Russia, olga.s.afan@gmail.com, https://orcid/0000-0001-7368-0797

Igor G. Loskutov, Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, i.loskutov@vir.nw.ru, https://orcid/0000-0002-9250-7225

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 23.04.2025; одобрена после рецензирования 09.06.2025; принята к публикации 09.07.2025.
The article was submitted on 23.04.2025; approved after reviewing on 09.06.2025; accepted for publication on 09.07.2025.

ИММУНИТЕТ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 633.11:632.4:631.523.11
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-270-284

CC BY

Резистентность интрогрессивных образцов мягкой пшеницы с генетическим материалом родов *Triticum* и *Aegilops* к ржавчинным болезням в Западной Сибири

Л. Я. Плотникова[1], В. В. Кнауб[1], Т. М. Жанболат[1], Е. С. Сколотнева[2], Ю. В. Лаприна[2], Е. В. Зуев[3]

[1] *Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, Омск, Россия*

[2] *Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия*

[3] *Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия*

Автор, ответственный за переписку: Людмила Яковлевна Плотникова, lya.plotnikova@omgau.org

Актуальность. Для защиты сортов мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) от ржавчинных болезней актуально расширение генетической базы селекции за счет родственных видов.
Материалы и метолы. Материалом для исследований послужили 39 образцов яровой мягкой пшеницы с идентифицированными и неизвестными генами устойчивости к бурой и стеблевой ржавчинам (*Lr* и *Sr*) видов родов *Triticum* L. и *Aegilops* L. Оценку устойчивости образцов к ржавчинным болезням проводили в 2020–2024 гг. в полевых условиях Западной Сибири (г. Омск) или в лабораторных условиях на стадии проростков. При эпифитотии бурой и стеблевой ржавчины в 2024 г. образцы охарактеризовали с помощью показателей «Площадь под кривой развития болезни» (ПКРБ) и «Индекс устойчивости» (ИУ).
Результаты и заключение. Основная часть образцов была высокоустойчива к бурой и стеблевой ржавчинам в 2020–2022 гг. На фоне эпифитотии 2024 г. высокую устойчивость к двум болезням проявили образцы ‘Дуэт’ (*Lr9*), KS90WGRC10 (*Lr39*), линии сорта ‘Thatcher’ (Tc) с идентифицированными генами *Lr18*, *Lr28*, *Lr35/Sr39*, *Lr37/Sr38*, *Lr50*, *Lr51*, а также ‘Pavon’ (*Lr47*), TA5602 (*Lr57*), Allard 52-1-1-17-1 (к-45165), ‘Yektay 406’, АНК-40. К стеблевой ржавчине были устойчивы Tc*Lr21*, Tc*Lr22a*, W2691 SR36TT1, ‘Вировка’, Allard 52-1-1-17-1, ‘Gouritz’, ‘Livanjka’, W2691 SR37TT2, ‘Гартус 598’, Wb. 58633, Лютесценс 849-81, Л-592, ‘Элемент 22’. В образцах Allard 52-1-1-17-1, ‘Gouritz’ и ‘Livanjka’ с помощью ПЦР-анализа идентифицирован ген *Sr36.* Устойчивые к болезням образцы имели низкую урожайность, что необходимо учитывать при их использовании в селекционных программах.

Ключевые слова: *Triticum aestivum*, родственные виды, бурая ржавчина, стеблевая ржавчина

Благодарности: работа выполнена по теме «Исследование фундаментальных основ устойчивости культурных и диких злаков к грибным болезням и абиотическим факторам среды», государственная регистрация № 121111100022-4. Молекулярно-генетические исследования проведены в рамках тематического плана Института цитологии и генетики по теме FWNR-2025-0020.
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Плотникова Л.Я., Кнауб В. В., Жанболат Т.М., Сколотнева Е.С., Лаприна Ю.В., Зуев Е.В. Резистентность интрогрессивных образцов мягкой пшеницы с генетическим материалом родов *Triticum* и *Aegilops* к ржавчинным болезням в Западной Сибири. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(3):270-284. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-270-284

© Плотникова Л.Я., Кнауб В. В., Жанболат Т.М., Сколотнева Е.С., Лаприна Ю.В., Зуев Е.В., 2025

IMMUNITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-270-284

Resistance of bread wheat introgression accessions with genetic material from the *Triticum* and *Aegilops* genera to rust diseases in Western Siberia

Lyudmila Ya. Plotnikova[1], Valeria V. Knaub[1], Tleuzhan M. Zhanbolat[1], Ekaterina S. Skolotneva[2], Yulia V. Laprina[2], Evgeny V. Zuev[3].

[1] *Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Omsk, Russia;*

[2] *Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

[3] *N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia*

Corresponding author: Lyudmila Ya. Plotnikova, lya.plotnikova@omgau.org

Background. Protection of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars from rust diseases strongly requires expanding the genetic base of breeding with relative species.
Materials and methods. The research material included 39 accessions of spring bread wheat with identified or unknown resistance genes (*Lr* and *Sr*) against leaf and stem rusts transferred from *Triticum* spp. or *Aegilops* spp. The leaf and stem rust development was estimated in 2020–2024 in the fields of Western Siberia (Omsk) and, at the seedling stage, under laboratory conditions. Under rust epidemics in 2024, the accessions' resistance was characterized using the indicators "Area Under the Disease Progress Curve" (AUDPC) and "Resistance Index" (RI).
Results and conclusion. Most of the accessions were highly resistant to leaf and stem rusts in 2020–2022. Under the 2024 epidemics, the following accessions manifested high resistance to both diseases: 'Duet' (*Lr9*), KS90WGRC10 (*Lr39*), the lines of cv. 'Thatcher' (Tc) with identified genes *Lr18*, *Lr28*, *Lr35*/*Sr39*, *Lr37*/*Sr38*, *Lr50* and *Lr51*, as well as 'Pavon' (*Lr47*), TA5602 (*Lr57*), Allard 52-1-1-17-1 (k-45165), 'Yektay 406', and ANK-40. Resistance to stem rust was determined in Tc*Lr21*, Tc*Lr22a*, W2691 SR36TT1, 'Virovka', Allard 52-1-1-17-1, 'Gouritz', 'Livanjka', W2691 SR37TT2, 'Gartus 598', Wb. 58633, Lutescens 849-81, L-592, and 'Element 22'. The *Sr36* gene was identified in Allard 52-1-1-17-1, 'Gouritz', and 'Livanjka' using a PCR analysis. The resistant accessions had low grain yields, which must be taken into account when using them in breeding programs.

Keywords: *Triticum aestivum*, relative species, leaf rust, stem rust

Acknowledgements: the work was carried out on the theme "Research on the fundamental resistance bases of cultivated and wild cereals to fungal diseases and abiotic environmental factors", State Registration No. 121111100022-4. The molecular genetic research was performed according the theme plan of the Institute of Cytology and Genetics, SB RAS, Theme No. FWNR-2025-0020.
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Plotnikova L.Ya., Knaub V.V., Zhanbolat T.M., Skolotneva E.S., Laprina Yu.V., Zuev E.V. Resistance of bread wheat introgression accessions with genetic material from the *Triticum* and *Aegilops* genera to rust diseases in Western Siberia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(3):270-284. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-270-284

Введение

Мягкая пшеница (*Triticum aestivum* L.) относится к числу важнейших видов, обеспечивающих питанием население планеты. В связи с ростом народонаселения необходимо повышать сборы зерна за счет увеличения потенциальной урожайности сортов, а также снижения потерь от абиотических и биотических факторов среды (Baker et al., 2020). По оценке FAO (Food and Agriculture Organization), наиболее вредоносными для растениеводства являются засухи с экстремальными температурами, а также болезни растений. Среди возбудителей болезней наиболее опасными признаны ржавчинные грибы, отличающиеся быстрой изменчивостью и способностью к массовому размножению и трансграничным/трансконтинентальным миграциям (FAO, 2021).

Пшеницу поражают 3 вида ржавчины: бурая, стеблевая и желтая (возбудители *Puccinia triticina* Erikss., *P. graminis* f. sp. *tritici* Erikss. et Henn. и *P. striiformis* West. f. sp. *tritici* Erikss., соответственно). *P. triticina* – наиболее пластичный вид из этого набора, который поражает посевы во всех земледельческих зонах мира. Бурая ржавчина долгое время регулярно развивалась на посевах пшеницы в зерновых регионах России, но в последние десятилетия отмечена депрессия болезни. Развитие стеблевой ржавчины во второй половине XX в. было ограничено массовым распространением в регионах мира сортов, защищенных геном *Sr31* от *Secale cereale* L. Однако после появления вирулентной к *Sr31* гену расы Ug99 болезнь распространилась в странах Африки, Ближнего Востока и Европы (Patpour et al., 2022). На территории России после длительной депрессии вспышки стеблевой ржавчины отмечены в Поволжье в 2013–2014 гг. и в Западной Сибири в 2015 г. Позже болезнь регулярно поражала посевы в разных регионах страны (Baranova et al., 2023). Изучение популяционного состава *Puccinia triticina* и *P. graminis* f. sp. *tritici* показало, что на обширной территории РФ существуют европейские и азиатские популяции, различающиеся по вирулентности и молекулярным маркерам. Западносибирские и североказахстанские популяции патогенов имеют высокий коэффициент сходства и отличаются большим набором генов вирулентности, по сравнению с европейскими (Gultyaeva et al., 2018, 2023; Skolotneva et al., 2023).

В настоящее время известно около сотни генов и QTL-локусов (Quantitative Trait Loci, QTLs) устойчивости пшеницы к бурой и стеблевой ржавчинам (McIntosh et al., 2018). Однако большая часть из них была преодолена ржавчинными грибами или малоэффективна. Для устойчивого зернового производства необходимо расширять спектр эффективных генов устойчивости в сортах пшеницы. После разработки методов межвидовой и межродовой (отдаленной) гибридизации в геном пшеницы перенесли большой набор генов устойчивости к грибным болезням от видов семейства Poaceae Barnh. Основными донорами генов устойчивости послужили виды родов *Triticum* L., *Aegilops* L. и *Thinopyrum* Á. Löve (King et al., 2024; Plotnikova, Knaub, 2024). В связи с активными микроэволюционными процессами в популяциях патогенов актуальна информация об устойчивости образцов мягкой пшеницы с известными и неидентифицированными генами к ржавчинным болезням в различных регионах страны.

Целью исследований были мониторинг устойчивости к бурой и стеблевой ржавчинам набора интрогрессивных образцов *Triticum aestivum* с генетическим материалом видов родов *Triticum* и *Aegilops* в Западной Сибири и характеристика их хозяйственно ценных свойств.

Материалы и методы

Растительный материал

Материалом для исследований служили 39 образцов яровой мягкой пшеницы, включая: 1) 23 интрогрессивных сорта и линии различного происхождения с генетическим материалом видов родов *Triticum* и *Aegilops* из коллекции Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР, г. Санкт-Петербург); 2) 16 образцов с известными и неидентифицированными генами устойчивости к бурой и стеблевой ржавчинам от тех же родственных видов (таблица). Идентифицированные гены устойчивости к бурой и стеблевой ржавчинам имели: линии сорта 'Thatcher' (Tc) Tc*Lr18* (T5BS.5BL-5G#1L), Tc*Lr21* (1DL,1DS), Tc*Lr22a*, Tc*Lr28* (T4AS.4AL-7S#2S), Tc*Lr35*/*Sr39* (2B/2SL-2SS#2.2SL#2), Tc*Lr37*/*Sr38* (NS/2AS), Tc*Lr44* (1B), Tc*Lr51* (T1AS.1AL-1S#F7-12L-1AL); другие сорта и линии KS90WGRC10 (*Lr39* = *Lr41*) (2DS), 'Pavon' (*Lr47*) (7AS-7S#1S-7AS.7AL), KS96WGRC36 (*Lr50*) (2BL), TA5602 (*Lr57*) (5DL.5DS-T5MS^{G}); CI 7778 (*Sr9e*) (6AL), W2691 SR36TT1 (*Sr36*) (2BS), W2691 SR37TT2 (*Sr37*) (4BL), RL 6087 (*Sr40*) (T2BL/2G#2S) (McIntosh et al., 2018). Гены *Lr22a*, *Lr37* и *Lr50* определяют возрастную устойчивость к бурой ржавчине (Adult Plant Resistance, APR). Остальные гены проявляются на всех стадиях развития растений, включая проростки (All-Stage Resistance, ASR). В качестве стандартов для полевых экспериментов использовали сорта западносибирской селекции: 'Памяти Азиева' (среднеранний), 'Дуэт' (среднеспелый), 'Элемент 22' (среднепоздний). Среднепоздний сорт 'Серебристая' служил индикатором восприимчивости к болезням.

Полевые эксперименты

Опыты проводили в южной лесостепи Западной Сибири (г. Омск) в 2020–2024 гг. Посев осуществляли по пару во второй половине мая на участке с лугово-черноземным типом почвы. Образцы высевали на делянках площадью 1 м^2 с нормой высева 500 всхожих зерен/м^2 в однократной повторности. В течение сезона проводили учет полевой всхожести образцов (в %) и фенологические наблюдения по общепринятым методикам. Уборку осуществляли механизированным способом в стадии полной спелости зерна. Перед уборкой часть растений убирали вручную для структурного анализа. Анализ элементов структуры урожая проводили по стандартным методикам. По результатам структурного анализа вычисляли средние значения показателей и ошибку средней (приведены на рис. 3) (Dospekhov, 1985).

Условия проведения полевых опытов

Погодные условия в период исследований были контрастными. В 2020–2023 гг. проявилась характерная для региона весенне-раннелетняя засуха в период с мая по первую половину июля. В 2021–2023 гг. недостаток осадков при повышенных температурах (на 3–10°C выше нормы) отмечали в период со второй половины июля по август. В 2024 г. регулярно выпадали умеренные осадки при температуре, близкой к средним многолетним значениям, но в третьей декаде мая (время посева) значительно снизилась температура. Гидротермический коэффициент (ГТК) за период с мая по август составил: в 2020 г. – 0,6; в 2021 г. – 0,7; в 2022 г. – 0,9; в 2023 г. – 0,8; в 2024 г. – 1,5. В соответствии с ГТК, сезоны 2020 и 2021 г.

характеризуются как очень засушливые, 2022 и 2023 г. – засушливые, а 2024 г. – влажный.

Оценка развития болезней

Учеты развития болезней в поле проводили в динамике с 7-суточным интервалом между наблюдениями. Реакцию растений на развитие бурой ржавчины оценивали по 5-балльной шкале: 0 – иммунитет (без пустул); 1 и 2 – пустулы мелкого или среднего размера, окруженные зонами некроза; 3 – средние и крупные пустулы, окруженные зонами хлороза; 4 – крупные сливающиеся пустулы (Mains, Jackson, 1926). Реакцию на поражение стеблевой ржавчиной в поле определяли по шкале, принятой в международном центре CIMMYT: R – иммунитет, без пустул; MR – мелкие пустулы с зонами некроза; MS – средние и крупные пустулы, окруженные зоной хлороза; S – крупные сливающиеся пустулы. Дополнительно развитие бурой и стеблевой ржавчины оценивали по степени поражения (в %) (Koyshibaev, 2018). В связи с отсутствием болезней на посевах, в 2022 г. была проведена лабораторная оценка реакции образцов на заражение бурой ржавчиной, а в 2022 и 2023 г. – стеблевой ржавчиной. Оценку проводили на 10-суточных проростках, для заражения использовали образцы урединиоспор популяций *Puccinia triticina* и *P. graminis* f. sp. *tritici*, собранных осенью на озимых сортах пшеницы. Реакцию растений на инокуляцию *P. triticina* и *P. graminis* f. sp. *tritici* оценивали по 5-балльным шкалам (Mains, Jackson, 1926; Stackman et al., 1962, соответственно). Реакции «0–2» считали устойчивыми, «3–4» – восприимчивыми.

Для определения особенностей взаимодействия пшеницы с популяциями ржавчинных патогенов по результатам динамических оценок поражения (в %) в 2024 г. были построены графики развития болезней и вычислены показатели «Площадь под кривой развития болезни» (ПКРБ) и «Индекс устойчивости» (ИУ). ПКРБ (в условных единицах) вычисляли по формуле (Kovalenko et al., 2012):

$$ПКРБ = 0,5\cdot(x_1 + x_2)\cdot(t_2 - t_1) + \ldots 0,5\cdot(x_{n-1} + x_n)\cdot(t_n - t_{n-1}),$$

где x_1 – поражение при первом учете, %; x_2 – поражение при втором учете, %; x_n – поражение при последнем учете; $(t_2 - t_1)$ – количество дней между вторым и первым учетом; $(t_n - t_{n-1})$ – количество дней между последним и предпоследним учетом; n – количество учетов.

ИУ к заболеваниям определяли как отношение ПКРБ конкретного образца к максимальной ПКРБ в опыте. На основании ИУ образцы классифицировали по уровню устойчивости: 0–10 – очень высокий; 0,11–0,35 – высокий; 0,36–0,65 – средний; 0,66–0,80 – низкий; > 0,80 – восприимчивый (Kovalenko et al., 2012).

Молекулярно-генетический анализ и фитопатологический тест

Присутствие гена *Sr36* в образцах, имеющих в родословной вид *Triticum timopheevii*, определяли с применением микросателлитного маркера Xstm773 и фитопатологического теста. Для молекулярного анализа использовали пару праймеров STM773-2F (5'-ATGGTTTGTG TTGTGTGTAGG-3') и STM773-2R (5'-AAACGCCCCAACCACCT CTCTC-3') (https://maswheat.ucdavis.edu/protocols/Sr36). ДНК растений выделяли с помощью модифицированного метода экстракции CTAB (подробно описан в статье Skolotneva et al., 2020). В 13 мкл реакционной смеси, состоящей из 6,5 мкл SE-БуферAS (Ammonium Sulfate), dNTPs (0,2 мМ каждого), праймеров (0,5 мкМ каждого), 1 е. а. Taq ДНК полимеразы (SibEnzyme) и стерильной деионизированной воды (до конечного объема), концентрация ДНК матрицы составляла 30–35 нг/мкл. ПЦР-амплификацию выполняли на приборе BioRad T100 (Bio-Rad, США). Отжиг праймеров STM773-2F/R осуществляли при 64–57–55°C. Детекцию продуктов амплификации проводили в 2-процентном агарозном геле, размер фрагментов оценивали с помощью маркера Step 50 plus («Биолабмикс»). В качестве положительного контроля использовали линию с геном *Sr36* (CI12632)/8*LMPG. Для фитопатологического теста использовали монопустульные изоляты *P. graminis* f. sp. *tritici* с генами авирулентности/вирулентности к *Sr36* (*Vir36*/*vir36*) из коллекции лаборатории молекулярной фитопатологии Института цитологии и генетики (ИЦиГ СО РАН). Тест проводили на 10-суточных проростках с соблюдением международных протоколов для работы с ржавчинными грибами (Skolotneva et al., 2020). Реакцию растений оценивали по шкале E. C. Stakman et al. (1962).

Результаты

В исследование включены образцы различного происхождения, созданные на основе видов родов *Triticum* и *Aegilops*. Среди этих видов *T. dicoccum* Schrank ex Schuebl., *T. spelta* L. и *A. tauschii* Coss. имели субгеномы, гомологичные *T. aestivum* (BBA^{u}A^{u}DD). Остальные виды по геномному составу частично или полностью отличались от *T. aestivum* (таблица). Мониторинг развития болезней проводили на естественном инфекционном фоне в период 2020–2024 гг. Погодные условия оказали сильное влияние на поражение пшеницы болезнями. В 2020 и 2022 г. исследуемые образцы созрели до начала развития бурой ржавчины, в 2021 и 2022 г. – до стеблевой, а в 2023 г. ржавчинные болезни на посевах не отмечены. Лучшие условия для развития комплекса ржавчинных болезней сложились в 2024 г.

В засушливом 2021 г. развитие бурой ржавчины на посевах было умеренным, при этом восприимчивые сорта 'Памяти Азиева' и 'Серебристая' были поражены до 20–30% (см. таблицу). Не были поражены сорта 'Дуэт' (*Lr9*), 'Элемент 22' (*Lr26/Sr31* + *Sr35*), а также образцы с известными генами устойчивости к бурой и стеблевой ржавчинам: *Lr21*, *Lr28*, *Lr35/Sr39*, *Lr39*, *Lr44*, *Lr47*, *Lr51*, *Lr57*, *Sr9e*, *Sr36*, *Sr37*, *Sr40*. Высокую устойчивость (поражение ≤ 10%) проявили линия Tc*Lr35/Sr39* и образцы с APR-генами *Lr22a*, *Lr37* и *Lr50*. Большая часть образцов из коллекции ВИР не поразилась бурой ржавчиной, за исключением 'Dipka', ВФТ-3 и Лютесценс 849-81 (поражение 4 / 10%). В 2022 г. провели лабораторную оценку устойчивости образцов к популяции *Puccinia triticina* на стадии проростков. Восприимчивую реакцию (3–4 балла) проявили сорта 'Памяти Азиева', 'Серебристая', 'Вировка', 'Руслада', I.BO. 3048/433, Wb. 59484, 'Dipka', ВФТ-3, а также образцы с APR-генами *Lr22a*, *Lr37*/*Sr38*, *Lr50*. Остальные образцы из коллекции ВИР были устойчивы (0–2 балла).

Во влажном 2024 г. развитие бурой ржавчины имело эпифитотийный характер. Первые симптомы болезни отмечены в фазе «колошение» 15 июля, а к 14 августа поражение большинства образцов достигло 70–100% (см. таблицу). На интенсивном инфекционном фоне высокую устойчивость (поражение 10%) проявили только образцы с генетическим материалом рода *Aegilops*: Tc*Lr28*, 'Pavon' (*Lr47*), Tc*Lr51* (от *A. speltoides* Tausch); TA5602 (*Lr57*) и 'Yektay 406' (от *A. geniculata* Roth); АНК-40 (*A. biuncialis* Vis.). В средней степени (3–4 / 20–30%) были пора-

Таблица. Результаты изучения развития болезней на образцах яровой мягкой пшеницы в Западной Сибири (г. Омск) (2020, 2021, 2024 г.)

Table. Results of studying the development of diseases on spring bread wheat accessions in Western Siberia (Omsk) (2020, 2021, and 2024)

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Образец, ген, происхождение / Accession, origin, gene	Источник устойчивости, геном / Resistance source, genome	Бурая ржавчина / Leaf rust				Стеблевая ржавчина / Stem rust			
			Реакция, % / Reaction, %		ПКРБ* / AUDPC*	ИУ* / RI*	% Реакция / % Reaction		ПКРБ* / AUDPC*	ИУ* / RI*
			2021	2024			2020	2024		
62867	‘Памяти Азиева’, РФ	–	4/30	4/100	1755	0,71	50S	60S	570	0,65
63500	‘Дуэт’, РФ, *Lr9*	*Aegilops umbellulata* UU	0/0	4/50	633	0,26	40S	30S	148	0,17
–	‘Элемент 22’, РФ, *Lr26/Sr31+Sr35*	*Secale. cereale*, *Triticum monococcum* RR+A^mA^m	0/0	4/100	1755	0,71	10MS	30S	190	0,22
64994	‘Серебристая’, РФ	–	4/20	4/100	1755	0,71	50S	70S	570	0,67
–	CI 7778, *Sr9e*	*Triticum dicoccum* BA^u	0/0	4/100	1945	0,79	30S	60S	345	0,39
63719	‘Вировка’, РФ		0/0	4/100	2455	1,00	20MS	10S	120	0,14
66008	‘Руслада’, РФ		0/0	4/100	1945	0,79	40S	50S	570	0,67
67413	Tc*Lr44*	*Triticum spelta* BA^uD	4/10	4/80	1110	0,45	30S	40S	345	0,39
64657	Лютесценс 393ae9-1, РФ		0/0	4/100	1755	0,71	30S	50S	345	0,39
58624	Tc*Lr21*	*Aegilops tauschii* DD	0/0	4/100	1260	0,51	0R	5MS	60	0,07
65463	Tc*Lr22a*		3/20	4/100	1260	0,51	5S	5MS	60	0,07
–	KS90WGRC10, *Lr39* (= *Lr41*)		0/0	4/10	240	0,10	0R	10MS	70	0,07
65264	– Мексика		0/0	4/100	1755	0,71	10MS	30S	428	0,49
–	RL6087, *Sr40*	*Triticum araraticum* A^tA^tGG	0/0	4/100	1755	0,71	0R	50S	515	0,59

Таблица. Продолжение
Table. Continued

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Образец, ген, происхождение / Accession, origin, gene	Источник устойчивости, геном / Resistance source, genome	Бурая ржавчина / Leaf rust				Стеблевая ржавчина / Stem rust			
			Реакция, % / Reaction, %		ПКРБ* / AUDPC*	ИУ* / RI*	% Реакция / % Reaction		ПКРБ* / AUDPC*	ИУ* / RI*
			2021	2024			2020	2024		
49454	T*cLr18*	*Triticum timopheevii* A^tA^tGG	0/0	4/20	390	0,16	10MS	5MS	60	0,07
–	KS96WGRC36, *Lr50*		4/10	4/30	390	0,16	0R	30S	148	0,17
–	W2691 SR36TT1, *Sr36*		2/5	4/100	860	0,35	10MS	10S	386	0,44
–	W2691 SR37TT2, *Sr37*		0/0	4/100	1755	0,71	0R	20S	155	0,18
45163	Wb. 59484, Канада		0/0	4/100	1010	0,41	10MS	100S	563	0,64
45164	Wb. 58633, Канада		0/0	4/50	1210	0,49	30S	30S	275	0,31
45165	Allard 52-1-1-17-1, США		0/0	4/60	508	0,21	30MS	30MS	190	0,22
49928	Allard 52-1-1-17-1, США		0/0	4/100	1820	0,74	10MS	50S	345	0,39
46224	I.BO. 3048/433, Италия		0/0	4/80	1645	0,65	20S	70S	570	0,67
57142	'Kalkee', Австралия		0/0	4/100	1755	0,71	50S	60S	570	0,67
58905	'Gowritz', Замбия		0/0	4/80	1755	0,71	10MR	50S	710	0,72
59398	'Гартус 598', РФ		0/0	4/100	1755	0,71	30S	20S	155	0,18
60340	'Dipka', ЮАР		4/10	4/100	1755	0,71	50S	50S	345	0,39
60991	'Livanjka', Югославия		0/0	4/100	1350	0,55	10MS	10MS	120	0,14
64137	'Gouritz', ЮАР		0/0	4/100	1336	0,54	5MR	10MS	120	0,14
48066	ВФТ-3, РФ	*Triticum timonovum* $A^tA^tA^tA^tGGGG$	4/10	4/100	1905	0,78	50S	80S	875	1,00
56970	Лютесценс 849-81, РФ		4/20	4/100	1360	0,52	50S	10S	120	0,14

Таблица. Окончание
Table. The end

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Образец, ген, происхождение / Accession, origin, gene	Источник устойчивости, геном / Resistance source, genome	Бурая ржавчина / Leaf rust				Стеблевая ржавчина / Stem rust			
			Реакция, % / Reaction, %		ПКРБ* / AUDPC*	ИУ* / RI*	% Реакция / % Reaction		ПКРБ* / AUDPC*	ИУ* / RI*
			2021	2024			2020	2024		
67410	Tc*Lr28*	*Aegilops speltoides* SS	0/0	4/10	120	0,05	5MR	20MS	155	0,18
66207	Tc*Lr35*/*Sr39*		4/10	4/10	120	0,11	5MR	20S	155	0,18
44748	'Pavon', *Lr47*		0/0	3/10	120	0,05	0R	30S	275	0,31
67418	Tc*Lr51*		0/0	3/10	120	0,05	0R	5MS	60	0,07
62905	Л-592, РФ		0/0	4/100	1350	0,55	30S	20S	155	0,18
65829	CS 2A/2M, *Lr28*, Австралия		0/0	4/10	120	0,05	10MS	10MS	155	0,18
67422	TA5602, *Lr57*, Австралия	*Aegilops geniculata* $U^SU^SM^GM^G$	0/0	3/10	120	0,05	0R	10MS	35	0,04
42640	'San Marino', Италия		0/0	4/100	1010	0,41	5MS	100S	563	0,64
44769	'Fenotipo 3', Италия		0/0	4/100	1735	0,71	50S	100S	563	0,64
62576	'Yektay 406', Турция		0/0	2/10	120	0,05	5MR	10MS	35	0,04
–	АНК-40, РФ	*Aegilops biuncialis* UUM^oM^o	0/0	3/10	120	0,05	0	10MS	35	0,04
–	Tc*Lr37*/*Sr38*	*Aegilops ventricosa* DDN^vN^v	3/10	3/20	240	0,11	10MR	20S	155	0,18
–	Среднее	–	–	–	1156 ± 116	0,48±0,11	–	–	316 ± 45	0,35 ± 0,05

Примечание: * – 2024 г.; ИУ – индекс устойчивости; ПКРБ – площадь под кривой развития болезни; Tc – почти изогенная линия сорта 'Thatcher'

Note: * – 2024; RI – Resistance Index; AUDPC – Area Under The Disease Progress Curve; Tc – near-isogenic line of cv. 'Thatcher'

жены образцы с генами *TcLr18* и KS96WGRC36 (*Lr50*) (от *Triticum timopheevii*) и Tc*Lr37/Sr38* (от *Aegilops ventricosa* Tausch). Большинство образцов, созданных с участием *Triticum dicoccum*, *T. spelta*, *T. araraticum* Jakubz., *T. timonovum* Heslot et Ferrary и *Aegilops tauschii*, были поражены в сильной степени (4 / 50–100%). В наборе образцов из коллекции ВИР присутствовали два образца Allard 52-1-1-17-1, различных по свойствам; из них более устойчивым был к-45165.

Для понимания особенностей проявления устойчивости образцов важную информацию дают графики развития болезней, а также показатели ПКРБ и ИУ. ПКРБ отражает скорость и длительность поражения образцов болезнью. ИУ дает возможность оценить устойчивость конкретного образца по сравнению с максимально пораженным, с учетом интенсивности инфекционного фона. Увеличение ПКРБ и ИУ коррелирует с потерями урожая зерна пшеницы (Kovalenko et al., 2012). Средние значения ПКРБ набора изученных образцов показали, что интенсивность поражения бурой ржавчиной была значительно выше, чем стеблевой (ПКРБ = 11 563 и 316, соответственно) (см. таблицу).

Анализ графиков развития бурой ржавчины показал большое разнообразие взаимодействия образцов с популяцией *Puccinia triticina* (рис. 1, а). По динамике поражения образцы разделились на несколько групп. Наиболее рано и стремительно бурая ржавчина развивалась на сорте ‘Вировка’, ее поражение через 14 сут. достигло 100%, а ПКРБ = 2455, и ИУ = 1,0 были максимальными в опыте (см. таблицу и рис. 1, а, трек 6). На многих образцах болезнь развивалась медленнее, включая: ‘Руслада’, Allard 52-1-1-17-1 (к-49928) и ВФТ-3 (трек 5,7,22,30); ‘Памяти Азиева’, ‘Элемент 22’, ‘Серебристая’, CI 7778 (*Sr9e*) и др. (трек 1, 3 ,4 ,9 ,13 ,14, 18, 24, 26, 27, 40); I.BO 3048/433 (трек 23). В соответствии с ИУ (0,68–0,79) перечисленные образцы были классифицированы как низкоустойчивые. На образцах Tc*Lr21*, Tc*Lr22a*, ‘Livjanka’, ‘Gouritz’, Лютесценс 849-81, Л-582 с генетическим материалом *Aegilops tauschii*, *Triticum timopheevii* и *T. timonovum* развитие бурой ржавчины началось на 14 сут. позже, но развивалось стремительно и достигло 100% к финальной оценке (трек 10, 11, 25, 28, 29, 31, 36). За счет более позднего поражения их ПКРБ была меньше, и по ИУ = 0,55 эти образцы были отнесены к среднеустойчивым. В эту же группу (ИУ = 0,45–0,49) вошли Tc*Lr44* и Wb. 58633, на которых болезнь прогрессировала медленнее или стабилизировалась в конце вегетации (треки 8 и 20).

Для образцов с APR-генами характерно замедленное развитие болезни (slow rusting) при восприимчивой реакции растений (Plotnikova, Shtubey, 2012). В 2024 г. эффект slow rusting к бурой ржавчине в сильной степени проявился у образцов с APR-генами *Lr37* и *Lr50* и ASR-генами *Lr18* и *Lr35* (см. рис. 1, а, треки 15, 16 и 33, 43). За счет этого ПКРБ были низкими, и образцы отнесли к высокоустойчивым (ИУ = 0,11–0,16). Менее выраженное замедление болезни проявилось на образцах Allard 52-1-1-17-1 (к-45165) и ‘Дуэт’ (ИУ = 0,21 и 0,26 соответственно) (треки 21 и 2). Самую высокую устойчивость (ИУ = 0,05) проявили образцы с генами видов: *Aegilops tauschii* – KS90WGRC10 (*Lr39*); *A. speltoides* – Tc*Lr28*, CS 2A/2M (*Lr28*), ‘Pavon’ (*Lr47*), Tc*Lr51*; *A. geniculata* – TA5602 (*Lr57*), ‘Yektay 406’; *A. biuncialis* – АНК-40. На этих образцах слабое поражение проявилось к концу вегетации и быстро стабилизировалось (трек 12, 32, 34, 35, 37, 38, 41, 42).

Стеблевая ржавчина в 2020 г. в средней степени поразила посевы, максимальное поражение 50S проявили образцы ‘Памяти Азиева’, ‘Серебристая’, ‘Dipka’, ‘Kalkee’, ВФТ-3, Лютесценс 849-81, ‘Fenotipo 3’ (см. таблицу). Высокую устойчивость (0R–10MR-MS) проявили образцы с генетическим материалом: *Aegilops tauschii* – Tc*Lr21*, Tc*Lr22a*, KS90WGRC10 (*Lr39*), к-65264; *Triticum timopheevii* – Tc*Lr18*, KS96WGRC36 (*Lr50*), W2691 SR36TT1 (*Sr36*), W2691 SR37TT2 (*Sr37*), Wb. 59484, Allard 52-1-1-17-1 (к-49928), ‘Gouritz’, ‘Livanjka’; *Aegilops speltoides* – Tc*Lr28*, CS 2A/2M (*Lr28*), Tc*Lr35/Sr39*, Tc*Lr51*; *A. geniculata* – TA5602 (*Lr57*), ‘San Marino’, ‘Yektay 406’; *A. biuncialis* – АНК-40; *A. ventricosa* – Tc*Lr37/Sr38*. При лабораторной оценке в 2022 и 2023 г. большая часть образцов показала устойчивую реакцию (0–2 балла), кроме сортов ‘Памяти Азиева’, ‘Kalkee’ и ВФТ-3.

В 2024 г. первые симптомы стеблевой ржавчины на посевах отмечены на две недели позже, чем бурой, – 29 июля. Иммунные к болезни образцы выявлены не были. Динамика развития болезни на изученных образцах различалась. Поражение образца ВФТ-3 развивалось стремительно (см. рис. 1, б, трек 30) и достигло 80S к финальной оценке (ПКРБ = 875, ИУ = 1,0) (см. таблицу). На образцах Wb. 59484, ‘San Marino’ и ‘Fenotipo 3’ болезнь развивалась медленно в период с 22 июля по 7 августа, но затем в течение 7 сут. поражение составило 100S (трек 19, 39 ,40). Образцы с генетическим материалом *Triticum dicoccum* (CI 7778 (*Sr9e*), *T. spelta* (Tc*Lr44* и Лютесценс 393ae9-1) (трек 5, 8, 9, 22, 27) имели финальную оценку 50S и проявили умеренный эффект slow rusting.

Образцы, имеющие в родословной виды *T. timopheevii* и *T. timonovum*, изучали с помощью молекулярно-генетического и фитопатологического анализов на присутствие гена *Sr36* (эффективен против расы возбудителя стеблевой ржавчины Ug99). На ДНК-матрицах тестируемого материала при использовании микросателлитного маркера STM773 получили ампликоны размером 155 пн и 180 пн, соответствующие аллелям *Sr36* устойчивого (R) и восприимчивого (S) генотипа. Аллель R в гомозиготе выявлен у образцов Allard 52-1-1-17-1 (к-45165), ‘Gouritz’ и ‘Livanjka’ (рис. 2, образцы 5, 7 и 10 соответственно). Результаты молекулярно-генетического анализа подтвердили с помощью фитопатологического теста с использованием двух изолятов, несущих гены авирулентности или вирулентности к *Sr36.*

На образцах RL6087 (*Sr40*) и ‘Gowritz’, происходящих от *T. araraticum* и *T. timopheevii*, болезнь начала развиваться на неделю позже и стабилизировалась на поздних этапах (см. рис. 2, б, трек 20, 34; ИУ = 0,59). На ряде образцов разного происхождения скорость развития ржавчины была умеренной, но при финальной оценке достигла 50% (см. рис. 2, б, трек 5, 8, 9, 22, 27; ИУ = 0,39). В группе с финальной оценкой 30S наблюдалась стабилизация развития болезни на образце к-65264 (трек 13). На остальных образцах с такой же оценкой развитие болезни было значительно замедлено (треки 20, 34 и 2, 3, 16, 21): Wb. 58633, ‘Pavon’ (*Lr47*), ‘Дуэт’ (*Lr9*), ‘Элемент 22’ (*Lr26/Sr31 + Sr35*), Allard 52-1-117-1 (к-45165). Образцы с идентифицированными генами устойчивости *Sr36* (W2691 SR36TT1, ‘Gouritz’, ‘Livanjka’), *Sr37* (W2691 SR37TT2), *Sr38* (Tc*Lr37/Sr38*) и *Sr39* (TcLr*35/Sr39*) имели сходные ИУ = 0,18–0,19 и относились к высокоустойчивым. Аналогичные показатели были у образцов разного происхождения: KS90WGRC10(*Lr39*), ‘Гартус 598’, Л-592, Tc*Lr28*, ‘Вировка’, Лютесценс 849-81 (треки 18, 26, 32, 33, 36, 43 и 6, 12, 17, 28, 29, 31). Очень высокую устойчивость (поражение 5MS, ИУ = 0,07) проявили образцы с генетическим материалом *T. timopheevii* – Tc*Lr18*; *Aegilops*

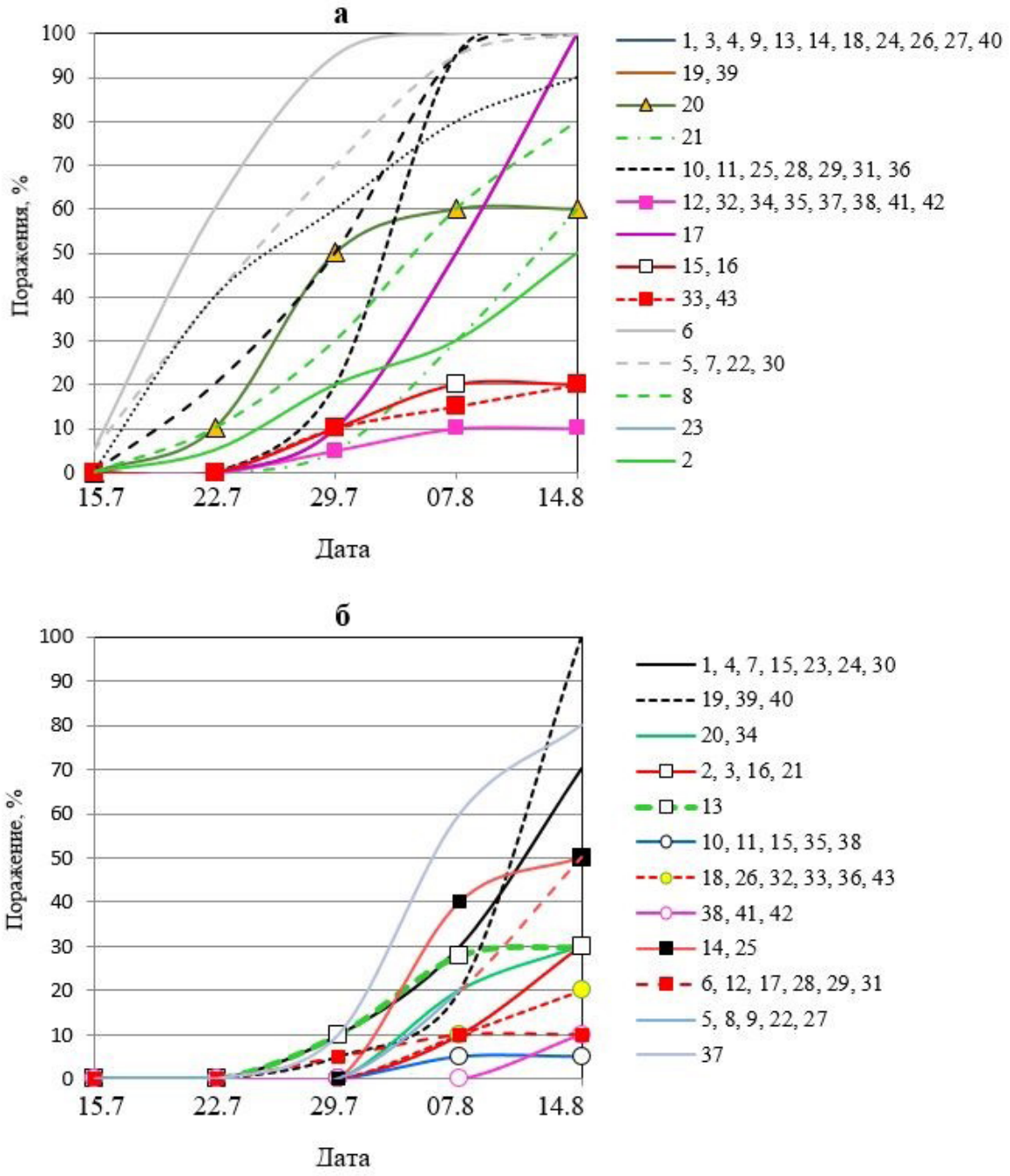


Рис. 1. Динамика развития бурой ржавчины (а) и стеблевой ржавчины (б) на образцах яровой мягкой пшеницы в Западной Сибири (г. Омск, 2024). Образцы: **1** – 'Памяти Азиева'; **2** – 'Дуэт'; **3** – 'Элемент 22'; **4** – 'Серебристая'; **5** – CI 7778 (*Sr9e*); **6** – 'Вировка'; **7** – 'Руслада'; **8** – Tc*Lr44*; **9** – Лютесценс 393ae9-1; **10** – Tc*Lr21*; **11** – Tc*Lr22a*; **12** – KS90WGRC10 (*Lr39*); **13** – к-65264; **14** – RL6087 (*Sr40*); **15** – Tc*Lr18*; **16** – KS96WGRC36 (*Lr50*); **17** – W2691 SR36TT1; **18** – W2691 SR37TT2; **19** – Wb. 59484; **20** – Wb. 58633; **21** – Allard 52-1-1-17-1 (к-45165); **22** – Allard 52-1-1-17-1 (к-49928); **23** – I.BO. 3048/433; **24** – 'Kalkee'; **25** – 'Gowritz'; **26** – 'Гартус 598'; **27** – 'Dipka'; **28** – 'Livanjka'; **29** – 'Gouritz'; **30** – ВФТ-3; **31** – Лютесценс 849-81; **32** – Tc*Lr28*; **33** – Tc*Lr35/Sr39*; **34** – 'Pavon' (*Lr47*); **35** – Tc*Lr51*; **36** – Л-592; **37** – CS 2A/2M (*Lr28*); **38** – TA5602 (*Lr57*); **39** – 'San Marino'; **40** – 'Fenotipo 3'; **41** – 'Yektay 406'; **42** – АНК-40; **43** – Tc*Lr37/Sr38*

Fig. 1. Dynamics of the leaf rust (a) and stem rust (б) development on spring bread wheat accessions in Western Siberia (Omsk, 2024). Accessions: **1** – 'Pamyati Azieva'; **2** – 'Duet'; **3** – 'Element 22'; **4** – 'Serebristaya'; **5** – CI 7778 (*Sr9e*); **6** – 'Virovka'; **7** – 'Ruslada'; **8** – Tc*Lr44*; **9** – Lutescence 393ae9-1; **10** – Tc*Lr21*; **11** – Tc*Lr22a*; **12** – KS90WGRC10 (*Lr39*); **13** – к-65264; **14** – RL6087 (*Sr40*); **15** – Tc*Lr18*; **16** – KS96WGRC36 (*Lr50*); **17** – W2691 SR36TT1; **18** – W2691 SR37TT2; **19** – Wb. 59484; **20** – Wb. 58633; **21** – Allard 52-1-1-17-1 (к-45165); **22** – Allard 52-1-1-17-1 (к-49928); **23** – I.BO. 3048/433; **24** – 'Kalkee'; **25** – 'Gowritz'; **26** – 'Gartus 598'; **27** – 'Dipka'; **28** – 'Livanjka'; **29** – 'Gouritz'; **30** – VFT-3; **31** – Lutescence 849-81; **32** – Tc*Lr28*; **33** – Tc*Lr35/Sr39*; **34** – 'Pavon' (*Lr47*); **35** – Tc*Lr51*; **36** – L-592; **37** – CS 2A/2M (*Lr28*); **38** – TA5602 (*Lr57*); **39** – 'San Marino'; **40** – 'Fenotipo 3'; **41** – 'Yektay 406'; **42** – ANK-40; **43** – Tc*Lr37/Sr38*

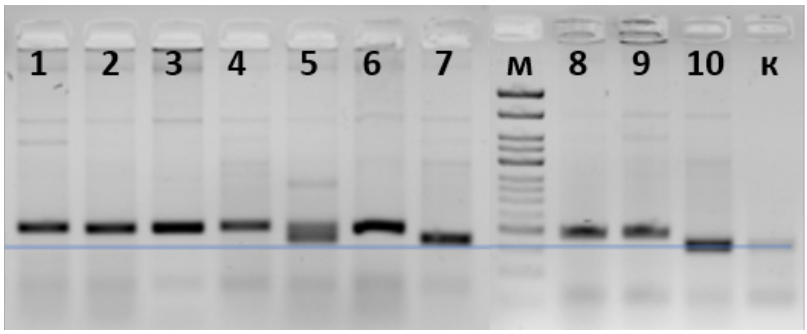


Рис. 2. Результаты определения маркера Xstm773 к гену *Sr36* в образцах яровой мягкой пшеницы:
М – ДНК-маркер Step 50 plus («Биолабмикс»); **к** – положительный контроль, линия *Sr36* CI12632)/8*LMPG;
1 – Wb. 59484; **2** – Wb. 58633; 3 – Allard 52-1-1-17-1 (к-49928); **4** – I.BO. 3048/433; **5** – Allard 52-1-1-17-1' (к-45165);
6 – 'Kalkee'; **7** – 'Gouritz'; 8 – 'Гартус 598'; **9** – 'Dipka'; **10** – 'Livanjka'

Fig. 2. Identification results for the marker Xstm773 to the *Sr36* gene in spring bread wheat accessions:
M – DNA-marker Step 50 plus (Biolabmix); **k** – positive control, line *Sr36* CI12632)/8*LMPG; **1** – Wb. 59484; **2** – Wb. 58633;
3 – Allard 52-1-1-17-1 (к-49928); **4** – I.BO. 3048/433; **5** – Allard 52-1-1-17-1 (к-45165); **6** – 'Kalkee'; **7** – 'Gouritz';
8 – 'Gartus 598'; **9** – 'Dipka'; **10** – 'Livanjka'

tauschii – Tc*Lr21*, Tc*Lr22a*; *A. speltoides* – T*cLr51* (трек 10, 11, 15, 35, 38). На образцах с генетическим материалом *A. geniculata* (TA5602 (*Lr57*) и 'Yektay 406'), а также *A. biuncialis* (АНК-40) слабое поражение (10MS) появилось только при финальной оценке (ИУ = 0,04).

Для использования образцов в селекционных программах необходимы сведения об их хозяйственно ценных свойствах. В работе приведены данные об основных признаках образцов, выделившихся по ИУ к болезням за 2022–2024 гг. Средний вегетационный период набора образцов колебался от 70,2 сут. (2023 г.) до 82,4 сут. (2022 г.) (рис. 3, а). Удлинение вегетационного периода в 2022 г. было связано с тем, что после длительной засухи в конце июля выпали осадки, спровоцировавшие образование дополнительных побегов и замедление созревания растений. В 2023 г. засуха и высокие температуры синхронизировали развитие растений и способствовали созреванию всех образцов в течение 68–73 сут. В 2024 г. вегетационный период большинства образцов не превысил 83 сут., кроме Лютесценс 849-81 (90 сут.). Самый короткий средний вегетационный период (71–75 сут.) имели образцы: 'Вировка', KS90WGRC10 (*Lr39*), W2691 SR36TT1 (*Sr36*), W2691 SR37TT2 (*Sr37*), 'Гартус 598', Tc*Lr35*/*Sr39*.

Урожайность образцов коррелирует с полевой всхожестью и массой зерна растений (продуктивностью). Адаптированные к условиям зоны сорта-стандарты 'Памяти Азиева', 'Дуэт' и 'Элемент 22' в условиях жесткой весенне-раннелетней засухи в 2022 и 2023 г. имели самую высокую всхожесть 60–70%, а во влажном 2024 г. – 68–72% (рис. 3, б). Среди изученных образцов наиболее близки по всхожести к стандартам в 2022–2024 гг.: KS90WGRC10 (*Lr39*) (63-71%) и Wb. 58633 (50–65%). Остальные образцы по всхожести в засушливых условиях значительно уступали стандартам. В 2024 г. посев проводили во влажную почву при пониженной температуре (среднедекадная – 8°C). Такие условия спровоцировали развитие корневых гнилей, что вызвало снижение всхожести до 40–53% у части образцов инорайонной селекции: Tc*Lr18*, W2691 SR37TT2 (*Sr37*), Wb. 58633, Wb. 59484, Allard 52-1-1-17-1 (к-45165), 'Yektay 406', TA5602 (*Lr57*).

Самую высокую среднюю массу зерна растений за контрастные 2022, 2023 и 2024 г. показали сорта-стандарты – от 2,04 до 2,30 г/растение (рис. 3, в). Среди остальных образцов наиболее высокую среднюю массу зерна растений сформировали 'Гартус 598' (2,00 г), а также 'Вировка', Wb. 59484 и АНК-40 (1,62–1,66 г). Самую низкую массу зерна растения имел высокоустойчивый к болезням сорт 'Yektay 406' (0,83 г). Урожайность образцов значительно колебалась в годы изучения. У сортов-стандартов средняя урожайность составила 267–282 г/м^2 (рис. 3, г). Ближе всего к стандартам по урожайности были KS90WGRC10 (*Lr39*), 'Гартус 598' и АНК-40 (168–198 г/м^2). Другие образцы уступали сортам-стандартам по средней урожайности в 1,5–3,8 раза.

Обсуждение

При разработке перспективных программ селекции пшеницы необходимо учитывать результаты мониторинга устойчивости потенциальных родительских форм к комплексу характерных для региона болезней. Для защиты пшеницы от ржавчинных болезней в геном мягкой пшеницы из видов родов *Triticum*, *Thinopyrum*, *Aegilops* и *Secale* был перенесен большой набор единичных или тесно сцепленных генов, которые использовались для защиты сортов.

Многолетние исследования популяций *Puccinia triticina* на территории России показали, что высокую эффективность на территории России в период 2000–2020 гг. проявили гены видов *Triticum dicoccoides* – *Lr53*; *T. timopheevii* – *Lr50*; *Thinopyrum* spp. – *Lr24*, *Lr29*, *Lr6Agi2*; *Aegilops tauschii* – *Lr39* и *Lr42*; *A. speltoides* – *Lr28*, *Lr47*, *Lr51*, *LrAsp*; *A. geniculata* – *Lr57*; *Secale cereale* – *Lr45*. Ген *Lr9* (от *Aegilops umbellulata* Zhuk.) был преодолен на территории Западной Сибири и Южного Урала, но сохранил эффективность в других регионах (Gultyaeva et al., 2021). При вспышках стеблевой ржавчины в регионах России в 2014 и 2015 г. эффективными оказались гены видов *Triticum araraticum* – *Sr40*; *T. timopheevii* – *Sr36*, *Sr37*; *Thinopyrum intermedium* (Host) Barkworth & D.R. Dewey – *Sr6Agi*; *Aegilops speltoides* – *Sr38* (Baranova et al., 2024). Однако в образцах азиатской популяции *Puccinia graminis* f. sp. *tritici*, собранных в Омской и Новосибирской областях в 2017 г., выявлена значительная доля изолятов, вирулентных к *Sr36* и *Sr38*, но вирулентность к *Sr24*, *Sr31*, *Sr39* и *Sr40* не установлена (Skolotneva et al., 2020).

В последние десятилетия основная часть сортов яровой мягкой пшеницы для Западной Сибири, Южного Урала и Северного Казахстана создается в рамках сотрудни-

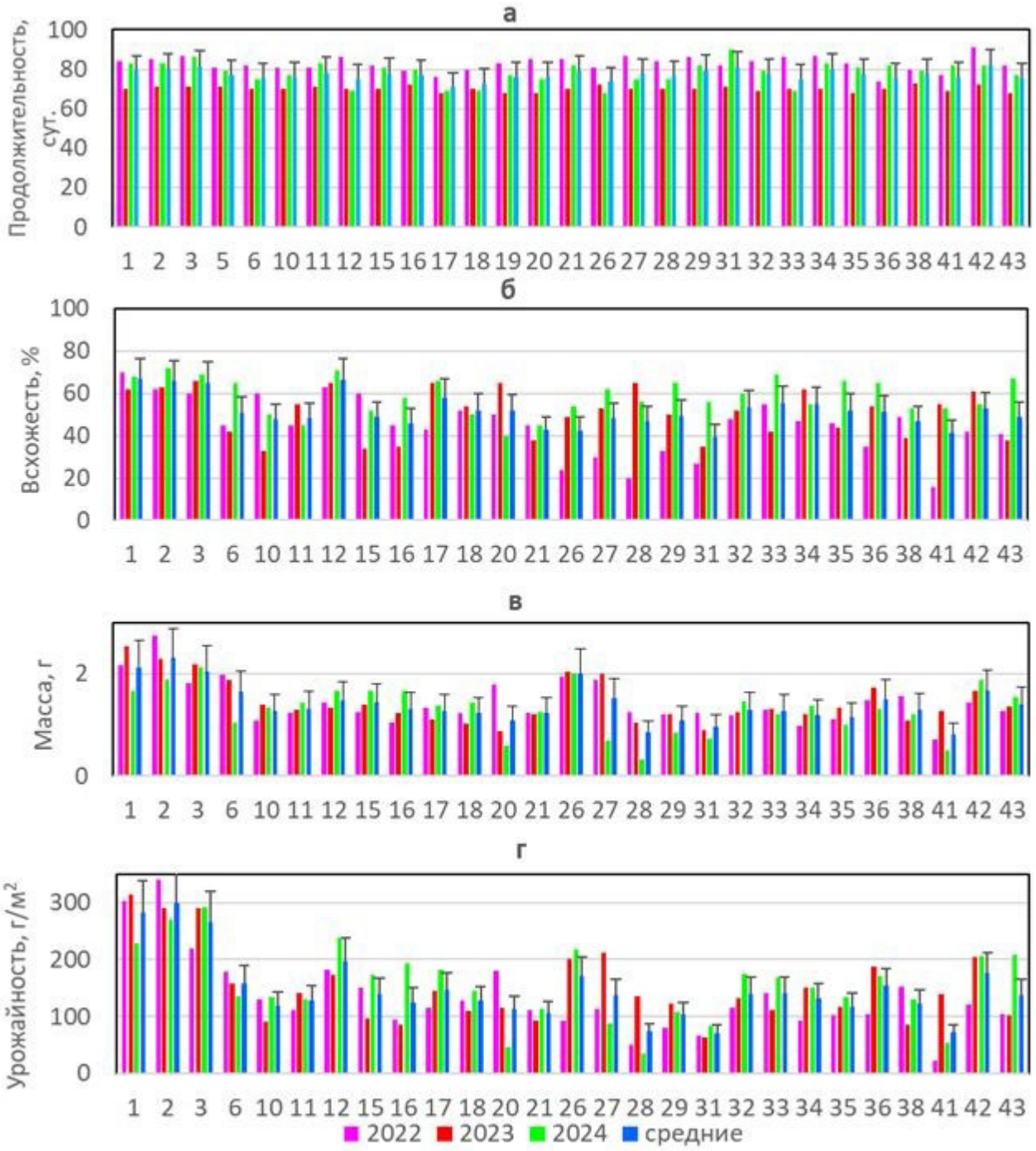


Рис. 3. Хозяйственно ценные признаки образцов яровой мягкой пшеницы: а – вегетационный период (сут.); б – полевая всхожесть (%); в – масса зерна растения (г); г – урожайность (г/м²). Образцы: **1** – ‘Памяти Азиева’; **2** – ‘Дуэт’; **3** – ‘Элемент 22’; **4** – ‘Серебристая’; **5** – CI 7778 (*Sr9e*); **6** – ‘Вировка’; **10** – Tc*Lr21*; **11** – Tc*Lr22a*; **12** – KS90WGRC10 (*Lr39*); **15** – Tc*Lr18*; **16** – KS96WGRC36 (*Lr50*); **17** – W2691 SR36TT1; **18** – W2691 SR37TT2; **19** – Wb. 59484; **20** – Wb. 58633; **21** – Allard 52-1-1-17-1 (к-45165); **26** – ‘Гартус 598’; **27** – ‘Dipka’; **28** – ‘Livanjka’; **29** – ‘Gouritz’; **31** – Лютесценс 849-81; **32** – Tc*Lr28*; 33 – Tc*Lr35/Sr39*; **34** – ‘Pavon’ (*Lr47*); **35** – Tc*Lr51*; **36** – Л-592; **38** – TA5602 (*Lr57*); **41** – ‘Yektay 406’; **42** – АНК-40; **43** – Tc*Lr37/Sr38*

Fig. 3. Important agronomic traits of spring bread wheat accessions: a – vegetation period (days); б – seed germination in the field (%); в – grain weight per plant (g); г – grain yield (g/m²). Accessions: **1** – ‘Pamyati Azieva’; **2** – ‘Duet’; **3** – ‘Element 22’; **4** – ‘Serebristaya’; **5** – CI 7778 (*Sr9e*); **6** – ‘Virovka’; **10** – Tc*Lr21*; **11** – Tc*Lr22a*; **12** – KS90WGRC10 (*Lr39*); **15** – Tc*Lr18*; **16** – KS96WGRC36 (*Lr50*); **17** – W2691 SR36TT1; **18** – W2691 SR37TT2; **19** – Wb. 59484; **20** – Wb. 58633; **21** – Allard 52-1-1-17-1 (к-45165); **26** – ‘Gartus 598’; **27** – ‘Dipka’; **28** – ‘Livanjka’; **29** – ‘Gouritz’; **31** – Lutescence 849-81; **32** – Tc*Lr28*; **33** – Tc*Lr35/Sr39*; **34** – ‘Pavon’ (*Lr47*); **35** – Tc*Lr51*; **36** – L-592; **38** – TA5602 (*Lr57*); **41** – ‘Yektay 406’; **42** – ANK-40; **43** – Tc*Lr37/Sr38*

чества по программе KASIB (Kazakhstan-Siberia Network for Spring Wheat Improvement), курируемой CIMMYT. В 2000–2016 гг. для защиты пшеницы от бурой и стеблевой ржавчины преимущественно использовали чужеродные гены/транслокации *Lr21*, *Lr9*, *Lr19*/*Lr25*, *Lr26*/*Sr31* и *Lr34*/*Sr57* с добавлением пшеничных расоспецифических генов *Lr1*, *Lr3*, *Lr10*, *Lr14a*, *Lr17*, *Lr20*. В единичных сортах выявлены *Lr24*/*Sr24*, *Lr37*/*Sr38*, *Lr39*, *LrAsp* и *Lr6Agi2*/*Sr6Agi2* (Skolotneva et al., 2021; Gultyaeva et al., 2024). В 2017–2019 гг. в сортах чаще всего были представлены гены *Lr1*, *Lr10* и *Lr26*/*Sr31*, а *Lr9*, *Lr19*/*Lr25*, *Lr24*/*Sr24*, *Lr6Agi2*/*Sr6Agi2* и ржаная транслокация 1AL/1RS встречались в единичных сортах, как правило, в комбинациях (Gultyaeva et al., 2024).

С учетом необходимости расширения генетического разнообразия сортов в наши исследования были включены образцы, созданные на основе набора видов родов *Triticum* и *Aegilops*, генетический материал которых отсутствовал или был мало представлен в сортах, предназначенных для возделывания в Западной Сибири, на Южном Урале и в Северном Казахстане. Большая часть изученного материала несла гены или имела в родословных виды с отличными от *Triticum aestivum* (гомеологичными) геномами: *T. timopheevii* (A^tA^tGG), *Aegilops speltoides* (SS), *A. geniculata* и *A. biuncialis* (UUMM), *A. ventricosa* (DDN^vN^v). Вид *Triticum timopheevii* признан перспективным донором устойчивости к грибным болезням, на его основе создан синтетический октоплоид *T. timonovum* ($A^tA^tA^tA^t$ GGGG) (Murashov, Morozova, 2008). Опыт использования интрогрессий от видов с гомеологичными геномами показал, что в них могут присутствовать комплексы генов устойчивости к набору болезней.

Оценка включенного в исследование материала в засушливых условиях 2020–2023 гг. показала, что основная часть образцов, включая образцы с идентифицированными *Sr*-генами и сорт 'Дуэт' (*Lr9*), проявила иммунитет или высокую устойчивость к бурой ржавчине. Исключение составили образцы с генетическим материалом *Tritucum dicoccum* ('Вировка', 'Руслада') и часть образцов с генами *T. timopheevii* и *T. timonovum* (I.BO. 3048/433, Wb. 59484, 'Dipka', ВФТ-3). Выявленный в поле иммунитет образцов с генами *Lr9*, *Lr28*, *Lr47*, *Lr51* и *Lr57* подтверждается результатами анализа популяции *Puccinia triticina* 2022 г., в которой соответствующие гены вирулентности не были определены (Meshkova, 2024). Полевая оценка выявила меньшую долю высокоустойчивых к стеблевой ржавчине образцов (≤ 10MS-S) в 2020 г. В их число вошли образцы с генетическим материалом *T. araraticum*, *T. timopheevii* (кроме Wb. 58633, 'Kalkee', 'Гартус 598', 'Dipka'), *Aegilops tauschii*, *A. speltoides* (кроме Л-592) и *A. biuncialis*.

Анализ графиков развития ржавчинных болезней, показателей ПКРБ и ИУ в 2024 г. показал большие различия между образцами. Выявлены четыре варианта взаимодействия образцов пшеницы с популяциями патогенов: 1) раннее и быстрое поражение растений; 2) инфицирование с задержкой на 7–14 сут. с дальнейшим стремительным развитием заболеваний; 3) замедление развития болезней; 4) стабилизация поражения. Стремительное развитие болезней на образцах второй группы свидетельствует о том, что в популяциях патогенов появлялись и быстро размножались вирулентные клоны. В трех последних вариантах значительно уменьшались ПКРБ и ИУ, что важно для снижения потерь урожая.

Для защиты сортов представляют интерес образцы, способные обеспечивать неспецифические эффекты slow rusting или стабилизации болезней при низком уровне поражения. В наибольшей степени устойчивость к бурой и стеблевой ржавчинам за счет замедления или стабилизации поражения проявили образцы с генетическим материалом *Triticum timopheevii* – Allard 52-1-1-17-1 (к-45165), Tc*Lr18* и Tc*Lr50*; *Aegilops tauschii* – KS90WGRC10 (Lr39); *A. speltoides* – Tc*Lr28*, TcLr*35*/*Sr39*, 'Pavon' (*Lr47*), Tc*Lr51*; *A. geniculata* – TA5602 (*Lr57*) и 'Yektay 406'; *A. biuncialis* – АНК-40; *A. ventricosa* – Tc*Lr37*/*Sr38*; *A. umbellulata* – 'Дуэт' (*Lr9*). Значительный эффект slow rusting и стабилизацию стеблевой ржавчины проявили образцы с генами *Triticum dicoccum* – 'Вировка'; *T. timopheevii* – 'Gouritz' (*Sr36*), 'Livanjka' (*Sr36*), W2691 SR37TT2 (*Sr37*), Wb. 58633 и 'Гартус 598'; *T. timonovum* – Лютесценс 849-8; *Aegilops tauschii* – Tc*Lr21*, Tc*Lr22a* и к-65264; *A. speltoides* – Л-592. Большинство этих образцов сохранило устойчивость к болезням в период 2020–2024 гг.

Устойчивость растений к болезням зависит от расового состава популяций патогенов. Проведенные ранее исследования популяций ржавчинных грибов показали, что они представляют динамические системы, в которых набор и соотношение рас зависят от биологических особенностей видов, генетического полиморфизма растений, условий среды, деятельности человека. В благоприятных условиях в популяциях преобладают сложные расы с большим числом генов вирулентности. При наступлении неблагоприятных условий увеличивается доля простых рас (Dyakov et al., 1998). После длительного периода депрессии, вызванного действием стрессовых факторов, состав популяций патогенов может измениться. Во время эпифитотий повышается вероятность возникновения новых фенотипов по вирулентности. Для закрепления в популяции вирулентная форма должна иметь достаточную приспособленность (Fitness), которая зависит от жизнеспособности и интенсивности размножения патогенов. Появление генов вирулентности может оказывать разное влияние на приспособленность – от отрицательного (вплоть до летального) до нейтрального и положительного. При летальном действии аллелей вирулентности новые патотипы в популяции не появляются, а при умеренном отрицательном размножаются медленно и могут элиминироваться в неблагоприятных условиях (Zhan, McDonald, 2013). В ходе длительных исследований *Puccinia triticina* показано, что около половины новых патотипов к следующему году элиминируется из популяций (Gultyaeva et al., 2023).

Причинами наблюдавшегося нами замедления и стабилизации развития ржавчинных болезней могут быть малая доля вирулентных клонов, низкая их приспособленность. Кроме того, дополнительным фактором может быть формирование системной приобретенной устойчивости (Systemic Acquired Resistance, SAR) в растениях. SAR может быть индуцирована контактом с неспециализированными патогенами, авирулентными штаммами специализированных патогенов или химическими индукторами. В результате развития SAR формируется комплекс защитных механизмов, который обеспечивает неспецифическую устойчивость к разным патогенам и вредителям (Prasad et al., 2020). Индукция SAR приводит к сокращению размеров мицелия и частичному подавлению размножения ржавчинных грибов, включая *P. triticina* (Plotnikova, 2009). Замедление развития бурой ржавчины на сорте 'Дуэт' (*Lr9*) может быть связано с развитием SAR после контакта с авирулентными штаммами, присутствующими в большом количестве в омской популяции

P. triticina (Meshkova, 2024). При последующем заражении стеблевой ржавчиной 'Дуэт' проявил эффект slow rusting, хотя ранее был восприимчив к этому заболеванию. Значительное замедление развития стеблевой ржавчины на линиях со сложными транслокациями Tc*Lr35*/*Sr39* и Tc*Lr37*/*Sr38* также могло быть связано с индукцией SAR после предварительного контакта с *P. triticina*. Действие SAR необходимо учитывать при проведении оценок в случаях поражения растений комплексом болезней, а также при создании пирамид генов устойчивости к ржавчинным болезням.

В омской популяции *P. triticina* выявлены резкие флуктуации по вирулентности. Так, в 2013 г. отметили вспышку размножения вирулентных к *Lr47* клонов (до 70%), но позже они элиминировались из популяции (Plotnikova et al., 2018). В популяции 2022 г. доли изолятов, вирулентных к *Lr47* и *Lr57,* составили 2,5% и 0,0%, а в 2023 г. они возросли до 29% и 82% соответственно (Meshkova, 2024). С учетом активных микроэволюционных процессов в западносибирских популяциях ржавчинных грибов необходим дальнейший мониторинг источников устойчивости к болезням, а также создание сортов с комплексом генов устойчивости, проявивших эффективность в условиях эпифитотии.

При включении источников устойчивости к болезням в селекционные программы важно учитывать их основные хозяйственно ценные свойства. Исследования набора образцов в контрастных погодных условиях Западной Сибири показали, что полезным свойством изученных образцов был короткий вегетационный период. Однако большая часть материала не была адаптирована к характерным для юга Западной Сибири засухам и почвенной микрофлоре и показала низкую урожайность. Как правило, образцы инорайонной селекции имели низкие показатели полевой всхожести, массы зерна растений и массы 1000 зерен. Исключение составил небольшой набор российских образцов ('Гартус 598', 'Вировка', АНК-40) и канадский Wb. 59484.

Выводы

1. Основная часть изученных образцов проявила иммунитет или высокую устойчивость к бурой и стеблевой ржавчинам при оценке в полевых и лабораторных условиях в 2020–2022 гг. Иммунные образцы не выявлены при вспышке бурой и стеблевой ржавчины в 2024 г.

2. В 2024 г. высокую групповую устойчивость (по индексу устойчивости) к бурой и стеблевой ржавчинам за счет позднего инфицирования, замедления или стабилизации поражения проявили образцы: KS90WGRC10 (*Lr39*), Allard 52-1-1-17-1 (к-45165), Tc*Lr18*, Tc*Lr50*, Tc*Lr28*, TcLr*35*/*Sr39*, 'Pavon' (*Lr47*), Tc*Lr51*, TA5602 (*Lr57*), 'Yektay 406', АНК-40, Tc*Lr37*/*Sr38*, 'Дуэт' (*Lr9*).

3. Высокую устойчивость к стеблевой ржавчине в 2024 г. показали образцы 'Вировка', Tc*Lr21,* Tc*Lr22a*, к-65264, W2691 SR36TT1, 'Gouritz' (*Sr36*), 'Livanjka' (*Sr36*), W2691 SR37TT2 (*Sr37*), 'Гартус 598', Wb. 58633, Лютесценс 849-81, Л-592, 'Элемент 22' (*Lr26*/*Sr31* + *Sr35*).

References / Литература

Baker L., Grewal S., Yang C.Y., Hubbart-Edwards S., Scholefield D., Ashling S. et al. Exploiting the genome of *Thinopyrum elongatum* to expand the gene pool of hexaploid wheat. *Theoretical and Applied Genetics*. 2020;133(7):2213-2226. DOI: 10.1007/s00122-020-03591-3

Baranova O., Solyanikova V., Kyrova E., Kon'kova E., Gaponov S., Sergeev V. et al. Evaluation of resistance to stem rust and identification of *Sr* genes in Russian spring and winter wheat cultivars in the Volga Region. *Agriculture*. 2023;13(3):635. DOI: 10.3390/agriculture13030635

Baranova O.A., Adonina I.G., Sibikeev S.N. Molecular cytogenetic characteristics of new spring bread wheat introgressive lines resistant to stem rust. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2024;28(4):377-386. [in Russian] (Баранова О.А., Адонина И.Г., Сибикеев С.Н. Молекулярно-цитогенетическая характеристика новых интрогрессивных линий яровой мягкой пшеницы, устойчивых к стеблевой ржавчине. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2024;28(4):377-386). DOI: 10.18699/vjgb-24-43

Dospekhov B.A. Methodology of field trial (with fundamentals of statistical processing of research results) (Metodika polevogo opyta [s osnovami statisticheskoy obrabotki resultatov issledovaniy]). 5th ed. Moscow: Agropromizdat; 1985. [in Russian] (Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд. Москва: Агропромиздат; 1985).

Dyakov Yu.T. Population biology of phytopathogenic fungi (Populyatsionnaya biologiya fitopatogennykh gribov). Moscow: Muravey; 1998. [in Russian] (Дьяков Ю.Т. Популяционная биология фитопатогенных грибов. Москва: Муравей; 1998).

FAO. The impact of disasters and crises on agriculture and food security. Rome: FAO; 2021. DOI: 10.4060/cb3673en

Gultyaeva E., Gannibal Ph., Shaydayuk E. Long-term studies of wheat leaf rust in the North-Western Region of Russia. *Agriculture*. 2023;13(2):255. DOI: 10.3390/agriculture13020255

Gultyaeva E., Shaydayuk E., Shreyder E., Kushnirenko I., Shamanin V. Genetic diversity of promising spring wheat accessions from Russia and Kazakhstan for rust resistance. *Plants*. 2024;13(17):2469. DOI: 10.3390/plants13172469

Gultyaeva E.I., Shaydayuk E.L., Gannibal Ph.B. Leaf rust resistance genes in wheat cultivars registered in Russia and their influence on adaptation processes in pathogen populations. *Agriculture*. 2021;11(4):319. DOI: 10.3390/agriculture11040319

Gultyaeva E.I., Shaydayuk E.L., Shamanin V.P., Akhmetova A.K., Tyunin V.A., Shreyder E.R. et al. Genetic structure of Russian and Kazakhstani leaf rust causative agent *Puccinia triticina* Erikss. populations as assessed by virulence profiles and SSR markers. *Agricultural Biology*. 2018;53(1):85-95. DOI: 10.15389/agrobiology.2018.1.85eng

King J., Dreisigacker S., Reynolds M., Bandyopadhyay A., Braun H., Crespo-Herrera L. et al. Wheat genetic resources have avoided disease pandemics, improved food security, and reduced environmental footprints: A review of historical impacts and future opportunities. *Global Change Biology*. 2024;30(8):e17440. DOI: 10.1111/gcb.17440

Koishybaev M. Wheat diseases. Ankara: FAO; 2018. [in Russian] (Койшыбаев М. Болезни пшеницы. Анкара: ФАО; 2018).

Kovalenko E.D., Kolomiets T.M., Kiseleva M.I., Zhemchuzhina A.I., Smirnova L.A., Shcherbik A.A. Methods for evaluation and selection of source material while developing wheat cultivars resistant to brown rust: Guidelines of the All-Russian Research Institute of Phytopathology (Metody otsenki i otbora iskhodnogo materiala pri sozdanii sortov pshenitsy, ustoychivykh k buroy rzhavchine: metodicheskiye rekomendatsii VNIIF). Moscow; 2012. [in Russian] (Коваленко Е.Д., Коломиец Т.М., Киселева М.И., Жемчужина А.И., Смирнова Л.А., Щербик А.А. Методы оценки

и отбора исходного материала при создании сортов пшеницы устойчивых к бурой ржавчине: методические рекомендации ВНИИФ. Москва; 2012).

Mains E.B., Jackson H.S. Physiologic specialization in the leaf rust of wheat *Puccinia triticina* Erikss. *Phytopathology*. 1926;16(2):89-120.

McIntosh R.A., Dubcovsky J., Rogers W.J., Xia X.C., Raupp W.J. Catalogue of gene symbols for wheat: 2018 supplement. *Annual Wheat Newsletter*. 2018;64:73-93.

Meshkova L.V. Virulence of spore samples of leaf rust of wheat in the forest-steppe of Omsk Province (Virulentnost sporovykh obraztsov buroy rzhavchiny pshenitsy v lesostepi Omskoy oblasti). In: *"Youth and Science-2024: The Driver of the Present and the Key to a Successful Future": Proceedings of the International Scientific and Practical Conference: Vol. 1*. Petropavlovsk: Kozybaev University; 2024. p.339-341. [in Russian] (Мешкова Л.В. Вирулентность споровых образцов бурой ржавчины пшеницы в лесостепи Омской области. В кн.: *«Молодежь и наука-2024: двигатель настоящего и залог успешного будущего»: материалы международной научно-практической конференции: Т. 1*. Петропавловск: СКУ им. М. Козыбаева; 2024. С.339-341).

Murashov V.V., Morozova Z.A. Comparative morphogenesis of *Triticum timopheevii* (Zhuk.) and synthetic octoploid species *T. timonovum* Heslot et Ferrary. *Moscow University Biological Sciences Bulletin*. 2008;63(3):127-133 DOI: 10.3103/S0096392508030073

Patpour M., Hovmøller M.S., Rodriguez-Algaba J., Randazzo B., Villegas D., Shamanin V.P. et al. Wheat stem rust back in Europe: diversity, prevalence and impact on host resistance. *Frontiers in Plant Science*. 2022;13:882440. DOI: 10.3389/fpls.2022.882440

Plotnikova L.Ya. Effect of benzothiadiazole, an inducer of systemic acquired resistance, on the pathogenesis of wheat brown rust. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2009;56(4):517-526. DOI: 10.1134/S1021443709040116

Plotnikova L.Ya., Knaub V.V. Exploitation of the genetic potential of *Thinopyrum* and *Agropyron* genera to protect wheat from diseases and environmental stresses. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2024;28(5):536-553. [in Russian] (Плотникова Л.Я., Кнауб В.В. Использование генетического потенциала родов *Thinopyrum* и *Agropyron* для защиты пшеницы от болезней и абиотических стрессов. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2024;28(5):536-553). DOI: 10.18699/vjgb-24-60

Plotnikova L.Ya., Meshkova L.V., Gultyaeva E.I., Mitrofanova O.P., Lapochkina I.F. A tendency towards leaf rust resistance decrease in common wheat introgression lines with genetic material from *Aegilops speltoides* Tausch. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2018;22(5):560-567. [in Russian] (Плотникова Л.Я., Мешкова Л.В., Гультяева Е.И., Митрофанова О.П., Лапочкина И.Ф. Тенденция преодоления устойчивости к бурой ржавчине интрогрессивных линий мягкой пшеницы с генетическим материалом *Aegilops speltoides* Tausch. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2018;22(5):560-567). DOI: 10.18699/VJ18.395

Plotnikova L.Ya., Shtubey T.Yu. Effectiveness of the wheat *Lr22b*, *Lr34*, and *Lr37* genes for adult plant resistance to leaf rust in west Siberia and the cytophysiological basis of their action. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2012;16(1):123-131. [in Russian] (Плотникова Л.Я., Штубей Т.Ю. Эффективность генов возрастной устойчивости пшеницы к бурой ржавчине *Lr22b*, *Lr34*, *Lr37* в Западной Сибири и цитофизиологическая основа их действия. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2012;16(1):123-131).

Prasad P., Savadi S., Bhardwaj S.C., Gupta P.K. The progress of leaf rust research in wheat. *Fungal Biology*. 2020;124(6):537-550. DOI: 10.1016/j.funbio.2020.02.013

Skolotneva E.S., Kelbin V.N., Morgunov A.I., Boiko N.I., Shamanin V.P., Salina E.A. Races composition of the Novosibirsk population of *Puccinia graminis* f. sp. *tritici*. *Mycology and Phytopathology*. 2020;54(1):49-58. [in Russian] (Сколотнева Е.С., Кельбин В.Н., Моргунов А.И., Бойко Н.И., Шаманин В.П., Салина Е.А. Расовый состав новосибирской популяции *Puccinia graminis* f. sp. *tritici*. *Микология и фитопатология*. 2020;54(1):49-58). DOI: 10.31857/S0026364820010092

Skolotneva E.S., Kelbin V.N., Shamanin V.P., Boyko N.I., Aparina V.A., Salina E.A. The gene *Sr38* for bread wheat breeding in Western Siberia. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2021;25(7):740-745. [in Russian] (Сколотнева Е.С., Кельбин В.Н., Шаманин В.П., Бойко Н.И., Апарина В.А., Салина Е.А. Ген *Sr38*: значение для селекции мягкой пшеницы в условиях Западной Сибири. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2021;25(7):740-745). DOI: 10.18699/VJ21.084

Skolotneva E.S., Kosman E., Kelbin V.N., Morozova E.V., Laprina Yu.V., Baranova O.A. et al. SSR variability of stem rust pathogen on spring bread wheat in Russia. *Plant Disease*. 2023;107(2):493-499. DOI: 10.1094/pdis-10-22-2373-re

Stakman E.C., Stewart D.M., Loegering W.Q. Identification of physiological races of *Puccinia graminis* f. sp. *tritici*. Washington, DC: USDA; 1962.

Zhan J., McDonald B.A. Experimental measures of pathogen competition and relative fitness. *Annual Review of Phytopathology*. 2013;51:131-153. DOI: 10.1146/annurev-phyto-082712-102302

Информация об авторах

Людмила Яковлевна Плотникова, доктор биологических наук, профессор, Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 644008 Россия, Омск. Институтская пл., 1, lya.plotnikova@omgau.org, https://orcid.org/0000-0002-9287-9870

Валерия Вячеславовна Кнаб, ассистент, Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 644008 Россия, Омск, Институтская пл., 1, vv.knaub@omgau.org, https://orcid.org/0000-0003-3035-0629

Тлеужан Маратулы Жанболат, аспирант, Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 644008 Россия, Омск, Институтская пл., 1, tm.zhanbolat1912@omgau.org, https://orcid.org/0009-0004-3706-8882

Екатерина Сергеевна Сколотнева, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, руководитель лаборатории, Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 10, skolotnevaES@bionet.nsc.ru, https://orcid.org/0000-0001-8047-5695

Юлия Владимировна Лаприна, лаборант-исследователь, Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 10, yulia.laprina@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-2575-2667

Евгений Валерьевич Зуев, кандидат сельскохозяйственных наук, руководитель отдела, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, ezuev@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0001-9259-4384

Information about the authors

Lyudmila Ya. Plotnikova, Dr. Sci. (Biology), Professor, Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 1 Institutskaya Sq., Omsk 644008, Russia, lya.plotnikova@omgau.org, https://orcid.org/0000-0002-9287-9870

Valeria V. Knaub, Assistant, Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 1 Institutskaya Sq., Omsk 644008, Russia, vv.knaub@omgau.org, https://orcid.org/0000-0003-3035-0629

Tleuzhan M. Zhanbolat, Postgraduate Student, Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 1 Institutskaya Sq., Omsk 644008, Russia, tm.zhanbolat1912@omgau.org, https://orcid.org/0009-0004-3706-8882

Ekaterina S. Skolotneva, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Head of a Laboratory, Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10 Akademika Lavrentyeva Ave., Novosibirsk 630090, Russia, skolotnevaES@bionet.nsc.ru, https://orcid.org/0000-0001-8047-5695

Yulia V. Laprina, Laboratory Research Assistant, Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10 Akademika Lavrentyeva Ave., Novosibirsk 630090, Russia, yulia.laprina@gmail.com, https://orcid.org/0009-0009-2575-2667

Evgeny V. Zuev, Cand. Sci. (Agriculture), Head of a Department, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, ezuev@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0001-9259-4384

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 01.04.2025; одобрена после рецензирования 23.06.2025; принята к публикации 14.07.2025.
The article was submitted on 01.04.2025; approved after reviewing on 23.06.2025; accepted for publication on 14.07.2025.

Статья редакционная
УДК 633.15:635.67:631.52:581.6

Выборочный список «Каталогов мировой коллекции ВИР» по кукурузе за 1961–2023 гг.

Серия «*Каталог мировой коллекции ВИР» / Catalogue of the VIR Global Collection* предназначена для селекционеров, специалистов-растениеводов для решения практических задач в селекции и семеноводстве, научных работников, осуществляющих фундаментальные и прикладные научные исследования, а также для учебных целей. Издания серии способствуют раскрытию потенциала мировой коллекции генетических ресурсов растений ВИР, гербарной коллекции ВИР (WIR) как важной части российских биоресурсных коллекций (БРК).
Редакция журнала «*Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*» с целью отражения многолетней издательской деятельности ВИР, привлечения дополнительного внимания к серии *«Каталог мировой коллекции ВИР» / Catalogue of the VIR Global Collection* и уточнения для авторов научных статей номеров и названий выпусков серии приняла решение опубликовать «*Выборочный список "Каталогов мировой коллекции ВИР" по кукурузе за 1961–2023 гг.*». Для удобства пользования материал расположен в хронологическом порядке согласно номерам выпусков. Мы надеемся, что список окажется полезным нашим читателям и авторам научных статей.

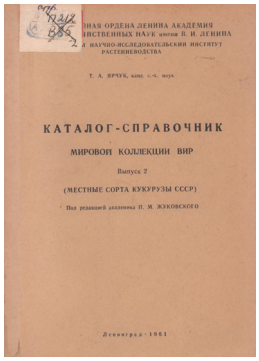
Для цитирования: Выборочный список «Каталогов мировой коллекции ВИР» по кукурузе за 1961–2023 гг. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции.* 2025;186(3):285-292. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-285-292

Editorial article

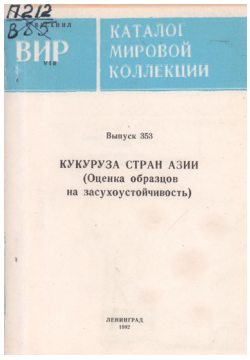
Selective list of the Catalogues of the VIR Global Collection on maize published in 1961–2023

The *Catalogue of the VIR Global Collection* series is addressed to plant breeders and crop experts solving practical problems in plant breeding and seed production, plant scientists conducting fundamental and applied research, teachers and learners. The publications within this series help to disclose the potential of the VIR global collection of plant genetic resources and the VIR herbarium (WIR) as an important part of Russian bioresource collections (BRC). The editors of the journal *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding* decided to publish the Selective list of the Catalogues of the VIR Global Collection on maize published in 1961–2023 to throw light on VIR's publishing activities, attract more attention to the *Catalogue of the VIR Global Collection* series, and specify the numbers and titles of the series' issues for authors of scientific manuscripts. For the users' convenience, the sources are arranged chronologically, following the order of issue numbers. The editors hope that this list will prove useful to our readers and authors.

For citation: Selective list of the Catalogues of the VIR Global Collection on maize published in 1961–2023. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(3):285-292. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-285-292



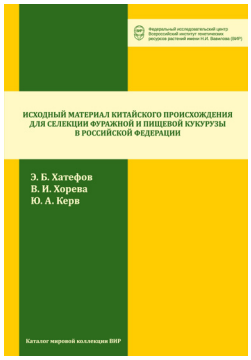
Выпуск 2



Выпуск 353

Выпуск 409

Выпуск 803



Выпуск 915

1. Каталог – справочник мировой коллекции ВИР. Вып. 1. (По самоопыленным линиям кукурузы) / Г.С. Галеев, Ф.Ф. Сидоров ; под редакцией П.М. Жуковского ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства. Ленинград : ВИР, 1961. 90 с. : табл.

2. Каталог – справочник мировой коллекции ВИР. Вып. 2. (Местные сорта кукурузы СССР) / Т.А. Ярчук ; под редакцией П.М. Жуковского ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства. Ленинград : ВИР, 1961. 87 с. : табл.

3. Каталог – справочник мировой коллекции ВИР. Вып. 4. (Коллекция лопающейся кукурузы) / Ф.Ф. Сидоров ; под редакцией П.М. Жуковского ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства. Ленинград : ВИР, 1961. 100 с. : табл.

4. Каталог – справочник [мировой коллекции ВИР]. О новых образцах коллекции ВИР / редакторы: З.Д. Артюгина, Р.Х. Макашева, М.М. Якубцинер ; ответственный за выпуск З.Д. Артюгина ; под редакцией Д.Д. Брежнева ; [составители: по кукурузе и крупяным: А.С. Кротов, А.Ф. Коломицына, И.И. Соколова, Г.Е. Шмараев, Т.А. Ярчук] ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства. Ленинград : ВИР, 1966. 122 с. (Экспресс-информация / ВАСХНИЛ, ВИР ; вып. 1). Из содерж.: (Кукуруза. С. 22-26).

5. [Каталог – справочник мировой коллекции ВИР]. Вып. 19. Каталог – справочник мировой коллекции ВИР по самоопыленным линиям кукурузы / составители: Г.С. Галеев, Ф.Ф. Сидоров, М.Д. Ковалевич, Е.В. Леонова ; под редакцией Ф.Ф. Сидорова ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства. Ленинград : ВИР, 1964. 113 с. : табл.

6. [Каталог – справочник мировой коллекции ВИР]. Вып. 29. Каталог – справочник мировой коллекции ВИР по сортам кукурузы из европейских стран / составитель: Т.А. Ярчук ; под редакцией Г.Е. Шмараева ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства. Ленинград : ВИР, 1966. 198, [1] с. : табл.

7. [Каталог мировой коллекции ВИР]. Вып. 32. Каталог образцов мировой коллекции ВИР, перспективных в условиях орошения / редакторы: Р.Х. Макашева, И.К. Иорданова, Р.А. Удачин, Ю.Н. Щербаков ; ответственный за выпуск Р.Х. Макашева ; под общей редакцией Д.Д. Брежнева ; [составители: по кукурузе и крупяным: Д.С. Переверзев, И.И. Соколова, Г.Е. Шмараев ; русская транскрипция названий иностранных сортов дана Б.Я. Розеном] ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1967. 134 с. (Экспресс-информация / ВАСХНИЛ, ВИР).

8. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 34. (Коллекция сахарной кукурузы) / составители: Г.Е. Шмараев, Н.В. Лейзерсон, В.С. Гаркушина ; под редакцией Г.Е. Шмараева ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1968. 216, [2] с.+ 7 отд. л. табл.

9. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 36. По самоопыленным линиям кукурузы / составители: Г.С. Галеев, М.Д. Ковалевич, Н.В. Лейзерсон ; под редакцией Г.Е. Шмараева ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1968. 133 с. : табл.

10. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 38. (Подвид крахмалистой кукурузы) / составитель: В.П. Горбунов ; под редакцией Г.Е. Шмараева ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1968. 131, [7] с. : табл.

11. Каталог [мировой коллекции ВИР]. Вып. 43. О новых образцах коллекции ВИР / подготовили: сотрудники отдела интродукции ВИР: (К.А. Кобылянская, А.Ф. Коломицына, Е.А. Толмачева, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков), заведующие Павловского и Майкопского интродукционно-карантинных питомников института: (В.С. Ефимова, Ю.М. Данилевич) ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1969. 53, [1] с. Из содерж.: (Кукуруза. С. 39-42).

12. Каталог [мировой коллекции ВИР]. Вып. 45. Гербарий Всесоюзного научно-исследовательского института им. Н.И. Вавилова / составители: В.А. Борковская, С.С. Восканьян ; под редакцией В.В. Никитина ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1969. 91 с. : фот.

13. Каталог – справочник [мировой коллекции ВИР]. Вып. 1 (50). Каталог – справочник генетической коллекции кукурузы / Н.Ф. Зосина, В.Г. Смирнов, Г.Е. Шмараев ; под редакцией Г.Е. Шмараева ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова[и др.]. Ленинград : ВИР, 1969. 121 с. : табл.

14. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 54, (ч. 2). По сортам кукурузы из европейских стран / составитель: Т.А. Ярчук ; под редакцией Г.Е. Шмараева ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1969. 159, [7] с. : табл.

15. [Каталог мировой коллекции ВИР]. Вып. 59. Каталог новых образцов мировой коллекции ВИР / составители: С.Н. Бахарева, К.А. Кобылянская, А.Ф. Коломицына, Е.А. Толмачева, Ю.Н. Щербаков ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1970. 98 с. Из содерж.: (Кукуруза. С. 49-51).

16. [Каталог мировой коллекции ВИР]. Вып. 66. Каталог образцов сельскохозяйственных культур, собранных зарубежными экспедициями ВИР в 1968–1969 гг. / составители: С.Н. Бахарева, Ф.В. Гуревич, К.А. Кобылянская, А.Ф. Коломицына, Е.А. Толмачева, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков : под редакцией К.З. Будина ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1970. 172, [1] с.

17. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 108. Сорта кукурузы азиатских стран / подготовлен сотрудниками: Т.А. Ярчук, Н.В. Лейзерсон ; под редакцией Г.Е. Шмараева ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1973. 232, [1] с. : табл.

18. [Каталог мировой коллекции ВИР]. Вып. 110. Каталог образцов сельскохозяйственных культур, поступивших в коллекцию ВИР в 1970 году / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, А.Ф. Коломицина, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Ф.В. Гуревич ; под редакцией К.З. Будина ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1973. 243 с. : табл. Из содерж.: (Образцы сельскохозяйственных культур, собранные экспедициями ВИР в зарубежных странах: Кукуруза. С. 19-20, 30, 45, 59-61 ; Образцы сельскохозяйственных культур, интродуцированные из зарубежных стран в порядке научного обмена и другими путями: Кукуруза. С. 95-98 ; Образцы сельскохозяйственных культур, собранные экспедициями ВИР в 1970 г. в различных района Советского Союза: Кукуруза. С. 206, 212).

19. [Каталог мировой коллекции ВИР]. Вып. 117. Каталог самоопыленных линий кукурузы мировой коллекции ВИР / Г.С. Галеев, М.Д. Ковалевич ; под редакцией Г.Е. Шмараева ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова, Кубанская опытная станция ВИР. Ленинград : ВИР, 1973. 88 с. : табл.

20. [Каталог мировой коллекции ВИР]. Вып. 126. Каталог образцов сельскохозяйственных культур, поступивших в коллекцию ВИР в 1971 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, А.Ф. Коломицина, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Ф.В. Гуревич ; под редакцией К.З. Будина ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1974. 245, [1] с. : табл. Из содерж.: (Кукуруза. С. 88-94).

21. [Каталог мировой коллекции ВИР]. Вып. 135. Каталог новых образцов кукурузы, поступивших в коллекцию ВИР в 1971–74 гг. / составители: А.Ф. Коломицина, Г.Е. Шмараев ; ответственный за выпуск Г.Е. Шмараев ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1974. 33 с. : табл.

22. [Каталог мировой коллекции ВИР]. Вып. 136. Каталог образцов сельскохозяйственных культур, поступивших в коллекцию ВИР в 1972 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, А.Ф. Коломицина, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Ф.В. Гуревич ; под редакцией К.З. Будина ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1974. 307, [1] с. : табл. Из содерж.: (Кукуруза. С. 137-146).

23. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 141. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1973 году / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, А.Ф. Коломицина, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Ф.В. Гуревич ; под редакцией К.З. Будина ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1975. 214, [1] с. : табл. Из содерж.: (Сесбания, тефрозия, кукуруза. С. 66-76).

24. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 150, ч. 2. Генетическая коллекция кукурузы / составители: Н.Ф. Зосина, В.Г. Смирнов, Г.Е. Шмараев ; под редакцией Г.Е. Шмараева ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова [и др.]. Ленинград : ВИР, 1975. 121 с. : табл., ил.

25. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 155. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1974 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Ф.В. Гуревич ; под редакцией К.З. Будина ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1975. 219, [1] с. : табл. Из содерж.: (Кукуруза. С. 118-124).

26. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 165. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1975 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ф.В. Гуревич ; переводчик Ф.В. Гуревич ; под редакцией Э.Т. Мещерова ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1976. 156 с. : табл. Из содерж.: (Кукуруза. С. 89-122).

27. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 166. Самоопыленные линии кукурузы / составители: Г.С. Галеев, М.Д. Ковалевич, Н.В. Лейзерсон ; под редакцией Г.Е. Шмараева ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова, Кубанская опытная станция ВИР. Ленинград : ВИР, 1976. 98 с. : табл.

28. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 179, ч. 1. Сорта кукурузы США / составители: Т.А. Ярчук, Н.В. Лейзерсон, Ю.А. Прохоров ; под редакцией Г.Е. Шмараева ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1976. 167, [1] с. : табл.

29. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 188. Генетические источники для решения актуальных проблем селекции сельскохозяйственных культур / составители: [кукуруза: Г.Е. Шмараев, А.П. Подольская, Н.В. Лейзерсон ; ответственный редактор А.Я. Трофимовская ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1977. 157, [1] с. : табл. Из содерж.: (Кукуруза. С. 72-88).

30. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 189. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1976 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Н.К. Петрова, Ф.В. Гуревич ; под редакцией Э.Т. Мещерова ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1977. 203 с. : табл. Из содерж.: (Кукуруза. С. 97-115).

31. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 205. Экспресс-информация о новых образцах / подготовили: сотрудники отдела интродукции: (С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Н.К. Петрова), заведующие интродукционно-карантинными питомниками института: (Е.П. Гогун, В.С. Ефимова, Н.А. Кирьян, Г.Н. Павлов, О.З. Сытник, Л.Г. Тарасовская, Ф.Т. Цангас) ; под редакцией Э.Т. Мещерова ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1977. 82, [2] с. Из содерж.: (Кукуруза. С. 46-51).

32. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 213. Самоопыленные линии кукурузы (оценка на засухоустойчивость и отзывчивость к орошению) / составитель: В.П. Горбунов ; под редакцией Г.С. Галеева, Г.Е. Шмараева ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1977. 270, [1] с. : табл.

33. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 214. Результаты предварительной оценки сортов сельскохозяйственных культур Западной Африки / составитель С.Н. Бахарева ; под редакцией Э.Т. Мещерова ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1977. 112 с. Из содерж.: (Кукуруза. С. 16-40).

34. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 223, ч. 2. Сорта кукурузы США / составители: Т.А. Ярчук, Н.В. Лейзерсон, Ю.А. Прохоров ; под редакцией Г.Е. Шмараева ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1978. 164, [1] с. : табл.

35. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 226. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1977 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Н.К. Петрова, Ф.В. Гуревич ; под редакцией Э.Т. Мещерова ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1978. 133, [1] с. : табл. Из содерж.: (Кукуруза. С. 72-84).

36. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 230. Экспресс-информация о новых образцах / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, Ю.Н. Щербаков, В.А. Чикова, Н.К. Петрова, заведующие интродукционно-карантинными питомниками института: (Е.П. Гогун, Г.Н. Павлов, В.С. Ефимова, Н.А. Кирьян, О.З. Сытник, Л.Г. Тарасовская, Ф.Т. Цангас) ; под редакцией Э.Т. Мещерова ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1978. 95, [1] с. Из содерж.: (Кукуруза. С. 46-55).

37. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 252. Образцы сельскохозяйственных культур, поступиавшие в 1978 г. / составители:С.Н. Бахарева,Л.Е. Горбатенко,К.А. Кобылянская,В.А. Чикова,Ю.Н. Щербаков,Ф.В. Гуревич,Н.С. Несмеянова ; под редакцией Э.Т. Мещерова ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1979. 245, [3] с. : табл. Из содерж.: (Кукуруза. С. 126-156).

38. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 266. Экспресс-информация о новых образцах / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Н.С. Несмеянова, заведующие интродукционно-карантинными питомниками института: (Е.П. Гогун, С.Г. Иванова, В.А. Полякова, Н.А. Кирьян, Г.Н. Павлов, О.З. Сытник, Л.Г. Тарасовская, Ф.Т. Цангас) ; под редакцией Э.Т. Мещерова ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1979. 109, [3] с. Из содерж.: (Кукуруза. С. 45-64).

39. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 277. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 277. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1979 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Ф.В. Гуревич, Н.С. Несмеянова ; под редакцией Э.Т. Мещерова ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1980. 197, [1] с. : табл. Из содерж.: (Кукуруза. С. 88-100).

40. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 284. Экспресс-информация о новых образцах / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Н.С. Несмеянова, Ф.В. Гуревич, заведующие интродукционно-карантинными питомниками института: (Е.П. Гогун, С.Г. Иванова, В.А. Полякова, Н.А. Кирьян, Г.Н. Павлов, О.З. Сытник, Л.Г. Тарасовская, Ф.Т. Цангас) ; под редакцией Э.Т. Мещерова ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1980. 126 с. Из содерж.: (Кукуруза. С. 36-56).

41. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 295. Генетические источники и доноры хозяйственно-ценных признаков и биологических свойств кукурузы / составители: Г.Е. Шмараев, Н.В. Лейзерсон, А.П. Подольская, П.С. Тараканов ; под редакцией В.Ф. Дорофеева ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1980. 123, [2] с.

42. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 305. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1980 г. / составители:С.Н. Бахарева,Л.Е. Горбатенко,К.А. Кобылянская,В.А. Чикова,Ю.Н. Щербаков,Ф.В. Гуревич,Н.С. Несмеянова ; под редакцией Э.Т. Мещерова ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1981. 110, [2] с. : табл. Из содерж.: (Кукуруза. С. 49-65).

43. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 321. Экспресс-информация о новых образцах / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Н.С. Несмеянова, Ф.Г. Гуревич, заведующие интродукционно-карантинными питомниками института: (Е.П. Гогун, С.Г. Иванова, В.А. Полякова, Н.А. Кирьян, Г.Н. Павлов, О.З. Сытник, Л.Г. Тарасовская, Ф.Т. Цангас) ; под редакцией Э.Т. Мещерова ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1981. 108 с. Из содерж.: (Кукуруза. С. 50-65).

44. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 322. Растительные ресурсы Советского Союза (экспедиции ВИР в 1971–1980 годах) / составители: Э.Т. Мещеров, К.А. Кобылянская ; под редакцией Э.Т. Мещерова ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1981. 125, [3] с. табл.

45. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 342. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1981 г. / составители:С.Н. Бахарева,Л.Е. Горбатенко,К.А. Кобылянская,В.А. Чикова,Ю.Н. Щербаков,Ф.В. Гуревич,Н.С. Несмеянова ; под редакцией Э.Т. Мещерова ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1982. 97, [1] с. : табл. Из содерж.: (Кукуруза. С. 33-42).

46. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 353. Кукуруза стран Азии (Оценка образцов на засухоустойчивость) / составители: В.П. Горбунов, Н.В. Лейзерсон, Г.Е. Шмараев ; под редакцией Г.Е. Шмараева ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1982. 161, [2] с. : табл

47. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 355. Экспресс-информация о новых образцах / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, заведующие интродукционно-карантинными питомниками института: (Е.П. Гогун, С.Г. Иванова, В.А. Полякова, Н.А. Кирьян, Г.Н. Павлов, О.З. Сытник, Л.Г. Тарасовская,

Ф.Т. Цангас) ; под редакцией Э.Т. Мещерова ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1982. 104 с. Из содерж.: (Кукуруза. С. 45-57).

48. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 356. Информация о зарубежных экспедициях и командировках ВИР в 1971–1980 гг. / составители: Э.Т. Мещеров, К.А. Кобылянская ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1982. 39, [1] с. : табл.

49. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 372. Новые самоопыленные линии лопающейся кукурузы / составители: Г.В. Матвеева, Г.Е. Шмараев, А.Д. Барсуков ; под редакцией Г.Е. Шмараева ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1983. 41, [3] с. : табл.

50. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 379. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1982 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Ф.В. Гуревич, Н.С. Несмеянова ; под редакцией Э.Т. Мещерова ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1983. 83, [1] с. : табл. Из содерж.: (Кукуруза. С. 31-36).

51. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 389. Доноры и источники важнейших хозяйственно-ценных признаков культурных растений для решения актуальных проблем селекции / составители: В.Ф. Дорофеев, В.А. Вершинина, К.С. Горская [и др.]; [составители: кукуруза и крупяные культуры: Н.П. Агафонов, Л.К. Иванюкович, А.Г. Ляховкин, Г.В. Матвеев, А.П. Подольская, Г.Е. Шмараев, Э.В. Юдина] ; под редакцией: В.Ф. Дорофеева, В.Д. Кобылянского ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1984. 267, [1] с. Из содерж.: (Кукуруза. С. 103-124).

52. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 394. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1983 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Ф.В. Гуревич, Н.С. Несмеянова ; под редакцией Э.Т. Мещерова ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1984. 100 с. : табл. Из содерж.: (Кукуруза. С. 32-39).

53. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 395. Экспресс-информация о новых образцах / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, С.Г. Иванова, В.А. Полякова, Е.П. Гогун, Н.А. Кирьян, Р.А. Оксузян, Л.П. Тарасовская, Ф.Т. Цангас, О.З. Сытник ; под редакцией Э.Т. Мещерова ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1983. 122, [2] с. Из содерж.: (Кукуруза. С. 52-68).

54. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 396. Генетическая коллекция кукурузы / составители: А.П. Подольская, Г.Е. Шмараев ; под редакцией Г.Е. Шмараева ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1984. 280 с. : табл.

55. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 397. Кукуруза Мексики и Гватемалы / составители: П.С. Тараканов, Г.Е. Шмараев, Н.В. Лейзерсон ; под редакцией Г.Е. Шмараева ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1983. 86, [1] с. : табл.

56. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 405. Кукуруза стран Африки / составители: В.П. Горбунов, Л.Я. Вардания, Н.В. Лейзерсон, Г.Е. Шмараев ; под редакцией Г.Е. Шмараева ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1984. 226, [1] с. : табл.

57. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 409. Новые самоопыленные линии сахарной кукурузы / составители: А.А. Капустин, Г.Е. Шмараев ; под редакцией Г.Е. Шмараева ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1985. 62 с. : табл.

58. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 418. Экспресс-информация о новых образцах / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Н.С. Несмеянова, С.Г. Иванова, В.А. Полякова, А.И. Танцюра, Н.А. Кирьян, Р.А. Оксузян, Л.П. Тарасовская, Ф.Т. Цангас, Е.И. Федоренко ; под редакцией Э.Т. Мещерова ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1984. 133, [3] с. Из содерж.: (Кукуруза. С. 46-63).

59. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 423. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1984 г. / составители: С.Н. Бахарева, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Ф.В. Гуревич, Н.С. Несмеянова ; под редакцией Э.Т. Мещерова ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1984. 131, [5] с. : табл. Из содерж.: (Кукуруза. С. 36-49).

60. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 441. Краткая характеристика новых зарубежных образцов сельскохозяйственных культур, поступивших в коллекцию ВИР в 1984 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, С.Г. Иванова, А.И. Танцюра, Н.А. Кирьян, Р.А. Оксузян, Ф.Т. Цангас, Н.С. Несмеянова, В.А. Полякова, Л.Г. Тарасовская, Е.И. Федоренко ; под редакцией Э.Т. Мещерова ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1986.145, [1] с. (Экспресс-информация / ВАСХНИЛ, ВИР). Из содерж.: (Кукуруза. С. 46-65).

61. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 444. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1985 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков ; под редакцией Э.Т. Мещерова ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1985. 66, [2] с. Из содерж.: (Кукуруза. С. 16-20).

62. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 448. Краткая характеристика новых зарубежных образцов сельскохозяйственных культур, поступивших в 1986 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, И.Г. Шмараев, Н.М. Зотеева, С.Г. Иванова, А.И. Танцюра, Н.А. Кирьян, Р.А. Оксузян, Ф.Т. Цангас, Е.И. Казакова, Т.А. Ко-

марова, В.А. Полякова ; под редакцией С.Н. Бахаревой ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1988. 141, [3] с. (Экспресс-информация / ВАСХНИЛ, ВИР). Из содерж.: (Кукуруза. С. 41-52).

63. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 473. Краткая характеристика новых зарубежных образцов сельскохозяйственных культур, поступивших в 1987 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, Н.М. Зотеева, С.Г. Иванова, А.И. Танцюра, Н.А. Кирьян, Р.А. Озксузян, Ф.Т. Цангас, Е.И. Казакова, И.Г. Шмараев, М.Х. Галаев, Т.Н. Кожанова, В.А. Полякова ; под редакцией С.Н. Бахаревой ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1988. 135, [3] с. (Экспресс-информация / ВАСХНИЛ, ВИР). Из содерж.: (Кукуруза. С. 31-38).

64. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 476. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1987 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, Н.М. Зотеева, К.А. Кобылянская, М.Х. Галаев, Т.А. Комарова, Л.А. Бавтутова ; под редакцией С.Н. Бахаревой ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1988. 31, [1] с. : табл. Из содерж.: (Кукуруза. С. 11).

65. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 487. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1988 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, Н.М. Зотеева, И.Г. Шмараев, Т.Н. Кожанова, М.Х. Галаев ; под редакцией С.Н. Бахаревой ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1989. 36, [1] с. : табл. Из содерж.: (Кукуруза. С. 11).

66. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 501. Краткая характеристика новых зарубежных образцов сельскохозяйственных культур, поступивших в 1988 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.А. Бурмистров, Л.Е. Горбатенко, Н.М. Зотеева, С.Г. Иванова, А.И. Танцюра, Р.А. Оксузян, Ф.Т. Цангас, Е.И. Казакова, И.Г. Шмараев, М.Х.-М. Галаев, Т.Н. Кожанова, В.А. Полякова, Н.А. Ткаченко, Н.Д. Дульнева, И.И. Конюхова, Н.Д. Василенко, А.Э. Ниязов, М.А. Гриценко ; под редакцией С.Н. Бахаревой ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1989. 159, [1] с. (Экспресс-информация / ВАСХНИЛ, ВИР). Из содерж.: (Кукуруза. С. 30-36).

67. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 533. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1989 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, Н.М. Зотеева, Т.Н. Кожанова, И.Г. Шмараев, М.Х. Галаев ; под редакцией С.Н. Бахаревой ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1990. 44, [2] с. : табл. Из содерж.: (Кукуруза. С. 10).

68. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 540. Краткая характеристика новых зарубежных образцов сельскохозяйственных культур, поступивших в 1989 г. / Л.А. Бурмистров, Л.Е. Горбатенко, Н.М. Зотеева, Т.Н. Кожанова, С.Г. Иванова, А.И. Танцюра, Р.А. Оксузян, Ф.Т. Цангас, И.Г. Шмараев, М.Х.-М. Галаев, В.А. Полякова, Н.А. Ткаченко, Н.Д. Дульнева, И.И. Конюхова, Н.Д. Василенко, А.Э. Ниязов, М.А. Гриценко ; под редакцией С.Н. Бахаревой ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1990. 102, [2] с. (Экспресс-информация / ВАСХНИЛ, ВИР). Из содерж.: (Кукуруза. С. 19-25).

69. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 541. Кукуруза европейских стран / составители: Г.Е. Шмараев, Г.В. Матвеева, Л.В. Павлова, Л.Л. Склярова ; под редакцией Г.Е. Шмараева ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1990. 80 с. : табл.

70. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 586. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1990 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, Н.М. Зотеева, Т.Н. Кожанова, И.Н. Делюкина, М.А. Гриценко ; под редакцией С.Н. Бахаревой ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1991. 63, [1] с. : табл. Из содерж.: (Кукуруза. С. 10).

71. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 589. Раннеспелая кукуруза / составители: Г.Е. Шмараев, Г.В. Матвеева, В.М. Кострикин, А.А Сидоров ; под редакцией Г.Е. Шмараева ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1991. 121, [2] с.

72. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 590. Самоопыленные линии кукурузы : (Оценка на отзывчивость к орошению) / составители: В.П. Горбунов [и др.] ; под редакцией Г.Е. Шмараева ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1991. 23, [1] с.

73. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 655. Краткая характеристика новых зарубежных образцов сельскохозяйственных культур, поступивших в 1989 г. / составители: Л.Е. Горбатенко, Л.А. Бурмистров, Н.М. Зотеева, С.Г. Иванова, С.В. Кузнецов, А.И. Танцюра, Ф.Т. Цангас, Н.А. Шестакова, Г.Т. Мезенцева, Т.А. Комарова, Н.Г. Галкина, В.Н. Омельченко, Н.Д. Василенко, В.А. Полякова, Н.Д. Дульнева, И.И. Конюхова, Н.В. Черкасова ; под редакцией: Л.Е. Горбатенко, Н.М. Зотеевой ; РАСХН, Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 1994. 92, [2] с. (Экспресс-информация / РАСХН, ВИР). Из содерж.: (Кукуруза. С. 20-22).

74. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 676. Краткая характеристика новых зарубежных образцов сельскохозяйственных культур, поступивших в 1993 г. / составители: Л.Е. Горбатенко, Н.М. Зотеева, А.Н. Афонин, Н.Д. Василенко, С.Г. Иванова, А.И. Танцюра, Г.Т. Мезенцева, М.А. Гриценко, Н.Н. Петровская, Н.И. Борисова, Н.Д. Дульнева, И.И. Конюхова ; под редакцией Л.Е. Горбатенко ; РАСХН, Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 1995. 105, [3] с. (Экспресс-информация / ВИР). Из содерж.: (Кукуруза. С. 35-38).

75. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 681. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1992–1994 г. / составители: Л.Е. Горбатенко, А.Н. Афонин, И.О. Никифорова, Л.В. Ковалева, Е.А. Колюшева, Г.Т. Мезенцева ; под редакцией Л.Е. Горбатенко ; РАСХН, Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 1996. 61, [1] с. : табл. Из содерж.: (Кукуруза. С. 19-20).

76. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 682. Информация об экспедициях ВИР, проведенных на территории России, стран Ближнего и Дальнего зарубежья в 1986–1994 г. / составители: Н.М. Зотеева, Т.А. Комарова ; под редакцией Л.Е. Горбатенко ; РАСХН, Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 1995. 65, [3] с. : табл.

77. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 687. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1996 г. / составители: Л.Е. Горбатенко, А.Н. Афонин, Л.А. Бурмистров, Г.Т. Мезенцева, Л.В. Багмет, Н.В. Беглецова, Е.А. Колюшева ; под редакцией Л.Е. Горбатенко ; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 1997. 38, [3] с. : табл. Из содерж.: (Кукуруза. С. 5).

78. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 688. Краткая характеристика новых зарубежных образцов сельскохозяйственных культур, поступивших в 1995 г. / составители: Л.Е. Горбатенко, Л.В. Багмет, И.О. Никифорова, А.Н. Афонин, С.Г. Иванова, Г.Т. Прокопенко, А.И. Танцюра, Ф.Т. Цангас, Н.Д. Василенко, Н.Д. Дульнева, И.И. Конюхова ; под редакцией Л.Е. Горбатенко ; РАСХН, Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 1997. 44 с. (Экспресс-информация / ВИР). Из содерж.: (Кукуруза. С. 15)

79. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 702. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1997 г. / составители: Л.Е. Горбатенко, Л.В. Багмет, В.Г. Фунтова ; под редакцией Л.Е. Горбатенко ; РАСХН, Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 1999. 51, [1] с. : табл. Из содерж.: (Кукуруза. С. 18-19).

80. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 716. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1999 г. / составители: Л.Е. Горбатенко, Л.В. Багмет, В.Г. Фунтова ; под редакцией Л.Е. Горбатенко ; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2000. 54, [2] с. Из содерж.: (Кукуруза. С. 29-35).

81. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 724. Кукуруза : (Самоопыленные линии селекции России и сопредельных государств) / составитель: Г.В. Матвеева ; под редакцией Г.Е. Шмараева ; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2002. 195, [3] с. : табл.

82. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 725. Краткая характеристика новых забубежных образцов сельскохозяйственных культур, поступивших в 1998 г. / составители: Л.Е. Горбатенко, В.Г. Фунтова, Л.В. Багмет, С.Г. Иванова, А.И. Танцюра, Н.Н. Петровская, Н.Д. Василенко, Т.Ф. Савченко, Е.В. Малиновская, Н.Д. Дульнева, И.И. Конюхова ; под редакцией Л.Е. Горбатенко ; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2000. 39, [3] с. (Экспресс-информация / РАСХН, ВИР). Из содерж.: (Кукуруза. С. 24).

83. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 732. Краткая характеристика новых зарубежных образцов сельскохозяйственных культур, поступивших в 2000 г. / составители: Л.Е. Горбатенко, Л.В. Багмет, В.Г. Фунтова, С.Г. Иванова, А.И. Танцюра, Н.Н. Петровская, Н.Д. Василенко, Т.Ф. Савченко, Е.В. Малиновская, Н.Д. Дульнева, И.И. Конюхова ; под редакцией Л.Е. Горбатенко ; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2001. 46, [2] с. (Экспресс-информация / РАСХН, ВИР). Из содерж.: (Кукуруза. С. 19-20).

84. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 755. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 2002 г. / составители: Л.Е. Горбатенко, В.Г. Фунтова, Т.М. Озерская ; под редакцией Л.Е. Горбатенко, Т.Н. Смекаловой ; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2004. 26, [2] с. (Экспресс-информация / РАСХН, ВИР). Из содерж.: (Кукуруза. С. 7).

85. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 758. Краткая характеристика новых зарубежных образцов сельскохозяйственных культур, поступивших в 2002 г. / составители: Л.Е. Горбатенко, В.Г. Фунтова, Т.М. Озерская, А.И. Танцюра, Н.Н. Петровская, Н.Д. Василенко, Н.Д. Дульнева, Т.И. Вальяникова, И.И. Конюхова ; под редакцией Л.Е. Горбатенко ; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2004. 37, [3] с. (Экспресс-информация / РАСХН, ВИР). Из содерж.: (Кукуруза. С. 11).

86. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 796. Самоопыленные линии кукурузы (оценка на устойчивость к болезням) / составители: В.Г. Иващенко, Г.В. Матвеева ; РАСХН, Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИЗР, 2010. 20 с.

87. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 800. Информация об экспедициях, проведенных в 1991–2009 г. / составители: Т.М. Озерская, О.А. Лисовская ; Н.И. Дзюбенко ; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2010. 49, [1] с. : табл.

88. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 803. Оценка образцов коллекции кукурузы на холодостойкость, фотопериодическую чувствительность и устойчивость к алюмотоксичность кислых почв / И.А. Косарева, Т.Ж. Олинга, Г.В. Матвеева, В.А. Кошкин ; под научной редакцией И.А. Косаревой ; РАСХН, Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2010. 32 с.

89. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 841. Генеалогия самоопыленных линий кукурузы коллекции / Г.В. Матвеева, В.Б. Корнеев ; под научной редакцией Э.Б. Хатефова ; Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2018. 65 с. : ил., табл.

90. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 861. Реакция образцов кукурузы на T, M и C типы цитоплазматической мужской стерильности = The response of maize accessions to the T, S and C types of cytoplasmic male sterility (CMS) / Э.Б. Хатефов, Г.В. Матвеева ; под научной редакцией А.Г. Горбачевой ; Федеральное агентство научных организаций, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2018. 75 с. : табл.

91. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 868. Кукуруза : комплексная оценка образцов коллекции = Maize : complex evaluation of the collection accessions / И.В. Филь, Г.В. Матвеева, О.В. Плющ, В.И. Хорева ; под научной редакцией Э.Б. Хатефова ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2018. 82 с. : табл.

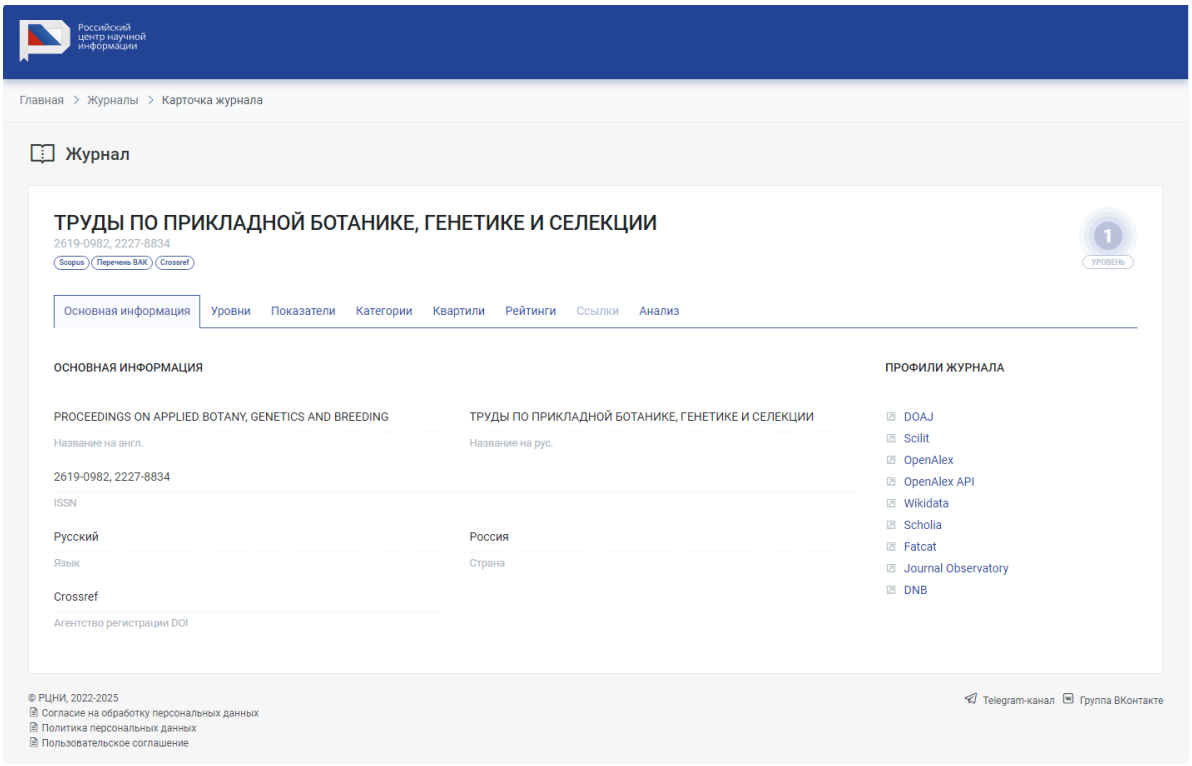
92. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 871. Тетраплоидная сахарная кукуруза : Исходный материал для селекции пищевой сахарной кукурузы в Российской Федерации = Tetraploid sweet corn : Source material for edible sweet corn breeding in the Russian Federation / Э.Б. Хатефов, Г.В. Матвеева ; под научной редакцией Э.Б. Хатефова ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2018. 18 с. : табл.

93. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 915. Кукуруза : исходный материал китайского происхождения для селекции фуражной и пищевой кукурузы в Российской Федерации = Maize : Source material of Chinese origin for feed and food maize breeding in the Russian Federation / Э.Б. Хатефов, В.И. Хорева, Ю.А. Керв ; под научной редакцией Э.Б. Хатефова ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2020. 91 с. : табл.

94. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 932. Редиплоидные линии кукурузы : (ресинтезированные из тетраплоидной популяции диплоидные линии для гибридной селекции кукурузы) = Rediploid maize lines : Rediploid maize lines : (diploid lines resynthesized from a tetraploid population for breeding hybrid maize) / Э.Б. Хатефов, В.И. Хорева, Б.Р. Шомахов, Р.С. Кушхова, З.Т. Хаширова, Р. А. Кудаев, А.Х. Гяургиев ; под научной редакцией Э.Б. Хатефова ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2021. 165 с. : табл., цв. ил.

95. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 943. Информация об экспедициях ВИР, проведенных в 2010–2020 гг. = Information about VIR collecting missions conducted in 2010–2020 / Т.М. Озерская, С.В. Шувалов ; под редакцией Л.В. Багмет ; Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2023. 58 с.

Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции
Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding



https://journalrank.rcsi.science/ru/record-sources/details/27665/

https://elpub.vir.nw.ru/jour

**Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции /
Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding**

**Научный рецензируемый журнал /
Scientific Peer-Reviewed Journal**

ISSN 2227-8834 (Print); ISSN 2619-0982 (Online)
4 выпуска в год (ежеквартально) / Publication frequency: quarterly
https://elpub.vir.nw.ru; e-mail: **trudyVIR@vir.nw.ru**

Языки: русский, английский / Languages: Russian, English
Индексируется в РИНЦ (НЭБ), Scopus, RSCI, DOAJ, AGRIS, входит в перечень изданий, публикации которых учитываются Высшей аттестационной комиссией России (ВАК РФ) при защите диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук / Indexed/abstracted by the Russian Science Citation Index on eLIBRARY.RU platform, Scopus, Russian Science Citation Index (RSCI) on the Web of Science platform, DOAJ, AGRIS, included in the list of publications recognized by the Russian Higher Attestation Commission (VAK RF) when candidate and doctoral dissertations are defended.

Открытый доступ к полным текстам / Open access to full texts
https://elpub.vir.nw.ru
http://www.vir.nw.ru/trudy
https://www.elibrary.ru/contents.asp?titleid=27909

Требования к статьям и правила рецензирования, электронный архив в открытом доступе и иная дополнительная информация размещены на сайте журнала **https://elpub.vir.nw.ru** / Full information for authors, reviewers, and readers (open access to electronic versions and subscription to print editions) can be found at **https://elpub.vir.nw.ru**

Прием статей через электронную редакцию на сайте журнала **https://elpub.vir.nw.ru**.
Предварительно необходимо зарегистрироваться как автору, затем в правом верхнем углу страницы выбрать «Отправить рукопись». После завершения загрузки материалов обязательно выбрать опцию «Отправить письмо», в этом случае редакция автоматически будет уведомлена о получении новой рукописи / Manuscripts are accepted via the online editing resource at the Journal's website **https://elpub.vir.nw.ru**. The sender needs to register as the author and select in the upper righthand corner "Send a manuscript". After the loading of the materials, the option "Send a letter" is to be chosen, so that the editors would be automatically informed that a new manuscript has been received.

Научный редактор: *Е.А. Соколова*
Корректура: *А.Г. Крылов*
Компьютерная верстка: *А.В. Иванов*

Адрес редакции:
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 42
Тел.: (812) 314-49-14; e-mail: trudyVIR@vir.nw.ru; i.kotielkina@vir.nw.ru

Почтовый адрес редакции:
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 42, 44

Подписано в печать 26.09.2025.
Дата выхода в свет 30.09.2025.
Формат 70×100$^{1}/_{8}$.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Печ. л. 36,75. Тираж 100 экз. Заказ № 386/1.

Подписной индекс 80333.
Журнал распространяется бесплатно и по подписке.

Издатель:
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр
Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова» (ВИР)

Адрес издателя:
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 42, 44

Отпечатано:
ООО «Р-ПРИНТ»
Адрес: 190121, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. Муниципальный Округ Коломна,
пер. Дровяной, д. 5, литера А, помещ. 1-Н