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

ТРУДЫ ПО ПРИКЛАДНОЙ БОТАНИКЕ, ГЕНЕТИКЕ И СЕЛЕКЦИИ, том 187

выпуск 1

(основаны Р. Э. Регелем в 1908 г.)

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2026

PROCEEDINGS ON APPLIED BOTANY, GENETICS AND BREEDING, vol. 187

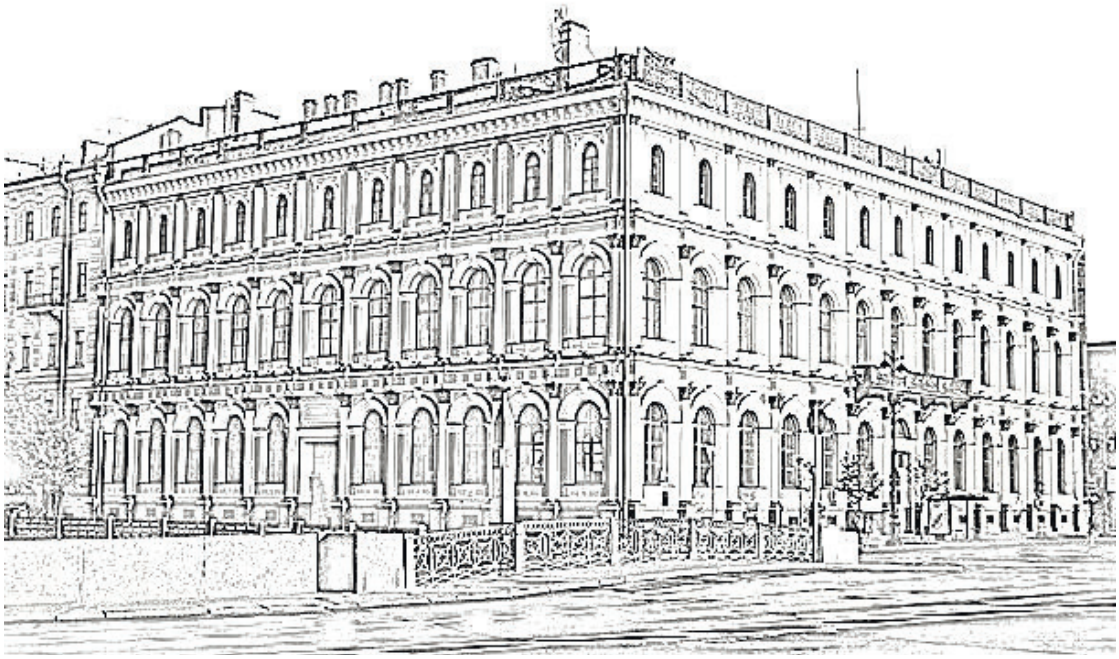
issue 1

(founded by Robert Regel in 1908)

ST. PETERSBURG
2026

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

2026 Том 187 выпуск 1

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1
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, академик НАН РК (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, 2026

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

Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding

2025 Volume 187 issue 1

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1
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, Full Member (Academician) of the NAS RK, 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, 2026

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, 2026. Т. 187, вып. 1. 278 с.

Проанализированы морфофизиологические показатели листового аппарата видов яблони в Центрально-Черноземном регионе России. Методом капиллярного электрофореза дана биохимическая характеристика качества плодов субтропических плодовых культур. Проведен скрининг скороспелых образцов амаранта коллекции ВИР по аминокислотному составу семян. Представлена технологическая оценка образцов пшеницы мягкой яровой в условиях Омской области. Исследовано изменение элементного состава растений подсолнечника при воздействии засухи и тяжелых металлов. Проведена комплексная оценка хозяйственной ценности тетраплоидной белозерной пищевой кукурузы (*Zea mays* L.). Рекомендованы источники хозяйственно ценных признаков среди межвидовых гибридов, созданных в ВИР, для их использования в селекции картофеля Республики Беларусь. Выделены перспективные сорта сливы домашней (*Prunus domestica* L.) зарубежной и российской селекции для юга России. Дана оценка современных сортов озимой ржи по технологическим свойствам зерна. Описаны морфологические и хозяйственно ценные признаки у образцов кунжута коллекции ВИР. Проанализирован селекционный потенциал образцов донника из коллекции ВИР в условиях Северного Кавказа. Рассмотрено влияние климата зоны полупустынь Астраханской области на хозяйственно ценные признаки хлопчатника. Изучены биохимические особенности основных разновидностей культурного овса коллекции ВИР. Перспективные источники хозяйственно ценных признаков выделены среди диких видов рода *Fragaria* L. для селекции в Северо-Западном регионе России. Определено наследование в F_1 дефектности пыльцевых зерен и установлено ее влияние на автофертильность растений подсолнечника. Полногеномный анализ ассоциаций применен для выявления маркеров, ассоциированных с хозяйственно ценными признаками овса. Исследованы скороспелость и фотопериодическая чувствительность образцов ячменя из стран Восточной Азии. Охарактеризованы и подобраны SSR-маркеры для оценки генетического разнообразия образцов проса посевного (*Panicum miliaceum* L.). Выявлены особенности развития пыльника и пыльцевого зерна у спонтанных естественных эгилопсно-пшеничных гибридов (*Aegilops biuncialis* × *Triticum* sp.). Оформлены номенклатурные стандарты сортов яблони селекции Северо-Кавказского ФНЦ садоводства, виноградарства, виноделия. Обобщены литературные данные по распространению, вредоносности альтернариоза и сосудистого бактериоза и устойчивости к ним у *Brassica rapa* L. Представлен обзор литературных данных и результатов анализа пангенома *in silico* аллельного разнообразия генов короткостебельности ячменя *HvGA20ox2*, *Sln1*, *HvBRI1* и *HvDep1*.

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, 2026. Vol. 187, iss. 1. 278 p.

Morphophysiological indicators in the leaf apparatus of apple-tree species have been analyzed for the Central Black Earth Region of Russia. Capillary electrophoresis has been employed for biochemical quality profiling of subtropical fruit crops. Early-maturing amaranth accessions from the VIR collection have been screened for the amino acid composition of their seeds. Technological assessment of spring bread wheat accessions has been performed in Omsk Province. The effect of drought and heavy metals on changes in the element composition of sunflower plants has been studied. Comprehensive assessment of tetraploid white-grained food maize (*Zea mays* L.) has been conducted to clarify their economic value. Sources of valuable agronomic traits among interspecific hybrids developed at VIR are recommended for utilization in potato breeding in the Republic of Belarus. Promising plum (*Prunus domestica* L.) cultivars developed by foreign and domestic breeders have been identified for the south of Russia. Modern winter rye cultivars have been evaluated in the context of technological properties of their grain. Morphological and important agronomic characteristics of sesame accessions from the VIR collection are described. Breeding potential of sweet clover accessions from the VIR collection has been analyzed under the conditions of the North Caucasus. Influence of the semidesert climate in Astrakhan Province on agronomic characters in cotton has been analyzed. Biochemical characteristics have been studied in the main botanical varieties of cultivated oats from the VIR collection. Sources of valuable agronomic traits promising for breeding in Northwest Russia have been selected among wild species of *Fragaria* L. Inheritance of defective pollen in F_1 and its effect on self-fertility have been studied in sunflower. A genome-wide association study has served as a tool to identify markers associated with valuable agronomic traits in oats. Barley accessions from East Asian countries have been tested for earliness and photoperiod sensitivity. SSR markers have been characterized and selected to evaluate the genetic diversity of proso millet (*Panicum miliaceum* L.) accessions. Patterns of anther and pollen grain development have been revealed in spontaneous natural *Aegilops*–wheat hybrids (*Aegilops biuncialis* ×*Triticum* sp.). Nomenclatural standards have been formalized for apple-tree cultivars developed at the North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making. Publications on the distribution and virulence of *Alternaria* leaf spot and black rot in *Brassica rapa* L., as well as on possible resistance mechanisms, are summarized. Available published data have been integrated with the *in silico* pangenome analysis results to characterize the allelic diversity of the barley semidwarfing genes *HvGA20ox2*, *Sln1*, *HvBRI1*, and *HvDep1*.

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, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Дубровский М.Л., Шлявас А.В., Кружков А.В., Чурикова Н.Л., Шамшин И.Н.
Анализ морфофизиологических показателей листового аппарата видов яблони в Центрально-Черноземном регионе России 9

Платонова Н.Б., Кунина В.А.
Биохимическая характеристика качества плодов субтропических плодовых культур методом капиллярного электрофореза 21

Соколова Д.В., Соловьева А.Е., Шеленга Т.В.
Скрининг скороспелых образцов амаранта коллекции ВИР по аминокислотному составу семян 30

Соловьева М.В., Кибкало И.А., Зырянов Б.В., Белан И.А., Обухова Н.С., Зуев Е.В.
Результаты технологической оценки образцов пшеницы мягкой яровой в условиях Омской области 40

Федорова Д.Г., Назарова Н.М., Укенов Б.С.
Изменение элементного состава растений подсолнечника при воздействии засухи и тяжелых металлов 49

Хакулова М.Ю., Аппаев С.П., Кегадуев И.А., Паритов А.Ю., Бузуртанов А.И., Кибкало И.А., Хатефов Э.Б.
Комплексная оценка хозяйственной ценности тетраплоидной белозерной пищевой кукурузы (*Zea mays* L.) 62

Чашинский А.В., Козлов В.А., Башко Д.В., Русецкий Н.В., Родькина И.А., Чалая Н.А., Рогозина Е.В.
Источники хозяйственно ценных признаков среди межвидовых гибридов, созданных в ВИР, и их использование в селекции картофеля Республики Беларусь 74

КОЛЛЕКЦИИ МИРОВЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СЕЛЕКЦИИ

Гореликова О.А.
Изучение перспективных сортов сливы домашней (*Prunus domestica* L.) зарубежной и российской селекции 88

Кибкало И.А., Сафонова И.В.
Изучение современных сортов озимой ржи по технологическим свойствам зерна 98

Кишлян Н.В., Мягкова Е.Г., Шеленга Т.В.
Изучение морфологических и хозяйственно ценных признаков кунжута у образцов коллекции ВИР 111

Просвирин Ю.А., Дук О.В., Чумакова В.В.
Селекционный потенциал образцов донника из коллекции ВИР в условиях Северного Кавказа 123

Туз Р.К., Мягкова Е.Г., Илларионова К.В., Подольная Л.П.
Влияние климата зоны полупустынь Астраханской области на хозяйственно ценные признаки хлопчатника 140

Харченко А.А., Новикова Л.Ю.
Дикие виды рода *Fragaria* L. как источник хозяйственно ценных признаков для селекции в Северо-Западном регионе России 152

Хорева В.И., Шеленга Т.В., Попов В.С., Сафонова Э.Э., Блинова Е.В., Малышев Л.Л., Лоскутов И.Г.
Биохимические особенности основных разновидностей культурного овса коллекции ВИР 165

ГЕНЕТИКА КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Демурин Я.Н., Рубанова О.А., Мелейчук А.В., Киров И.В., Казанцев М.Ю.
Наследование в F_1 дефектности пыльцевых зерен и ее влияние на автофертильность растений подсолнечника 180

Швачко Н.А., Семилет Т.В., Ковалева О.Н., Лукина К.А., Лоскутов И.Г.
Применение полногеномного анализа ассоциаций для выявления маркеров, ассоциированных с хозяйственно ценными признаками овса 190

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

Абдуллаев Р.А., Баташева Б.А., Ковалева О.Н., Щедрина З.А., Радченко Е.Е.
Скороспелость и фотопериодическая чувствительность образцов ячменя из стран Восточной Азии 204

Архестова Д.Х., Хаудов А.Д., Кулемина Т.В.
Характеристика и подбор SSR-маркеров для оценки генетического разнообразия образцов проса посевного (*Panicum miliaceum* L.) 217

СИСТЕМАТИКА, ФИЛОГЕНИЯ И ГЕОГРАФИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Торшилова А.А., Ивасенко Ж.В., Титова Г.Е., Чикида Н.Н.
Развитие пыльника и пыльцевого зерна у спонтанных естественных эгилопсно-пшеничных гибридов (*Aegilops biuncialis* × *Triticum* sp.) 228

Ульяновская Е.В., Богданович Т.В., Чернуцкая Е.А., Таловина Г.В.
Номенклатурные стандарты сортов яблони селекции Северо-Кавказского ФНЦ садоводства, виноградарства, виноделия 238

ОБЗОРЫ

Огудин Г.С., Артемьева А.М.
Альтернариоз и сосудистый бактериоз у *Brassica rapa* L.: механизмы устойчивости, селекционные решения и перспективы 252

Поротников И.В., Лукина К.А., Антонова О.Ю., Ковалева О.Н.
Аллельное разнообразие генов короткостебельности ячменя *HvGA20ox2*, *Sln1*, *HvBRI1* и *HvDep1* – интеграция литературных данных и результатов анализа пангенома *in silico* 262

ИСТОРИЯ АГРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ВИР. СЛАВНЫЕ ИМЕНА

Лучшие книги ВИР 2025 года 277

CONTENTS

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Dubrovsky M.L., Shlyavas A.V., Kruzhkov A.V., Churikova N.L., Shamshin I.N.
Analysis of morphophysiological indicators in the leaf apparatus of apple-tree species in the Central Black Earth Region of Russia 9

Platonova N.B., Kunina V.A.
Biochemical quality profiling of subtropical fruit crops by capillary electrophoresis 21

Sokolova D.V., Solovyeva A.E., Shelenga T.V.
Screening of early-maturing amaranth accessions from the VIR collection for the amino acid composition of seeds 30

Solovieva M.V., Kibkalo I.A., Zyryanov B.V., Belan I.A., Obukhova N.S., Zuev E.V.
Technological assessment results for spring bread wheat accessions in Omsk Province 40

Fedorova D.G., Nazarova N.M., Ukenov B.S.
Changes in the element composition of sunflower plants under the effect of drought and heavy metals 49

Khakulova M.Yu., Appaev S.P., Kegaduev I.A., Paritov A.Yu., Buzurtanov A.I., Kibkalo I.A., Khatefov E.B.
Comprehensive assessment of the economic value in tetraploid white-grained food maize (*Zea mays* L.) 62

Chashynski A.V., Kozlov V.A., Bashko D.V, Rusetski N.V., Rodkina I.A., Chalaya N.A., Rogozina E.V.
Sources of valuable agronomic traits among interspecific hybrids developed at VIR and their utilization in potato breeding in the Republic of Belarus 74

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

Gorelikova O.A.
Promising plum (*Prunus domestica* L.) cultivars developed by foreign and domestic breeders: a study in the south of Russia 88

Kibkalo I.A., Safonova I.V.
The study of modern winter rye cultivars based on the technological properties of grain 98

Kishlyan N.V., Myagkova E.G., Shelenga T.V.
A study of morphological and important agronomic characteristics in sesame accessions from the VIR collection 111

Prosvirin Yu.A., Duk O.V., Chumakova V.V.
Breeding potential of sweet clover accessions from the VIR collection under the conditions of the North Caucasus 123

Tuz R.K., Myagkova E.G., Illarionova K.V., Podolnaya L.P.
Influence of the semidesert climate in Astrakhan Province on agronomic characters in cotton 140

Kharchenko A.A., Novikova L.Yu.
Wild species of *Fragaria* L. as a source of valuable agronomic traits for breeding in Northwest Russia 152

Khoreva V.I., Shelenga T.V., Popov V.S., Safonova E.E., Blinova E.V., Malyshev L.L., Loskutov I.G.
Biochemical characteristics of the main botanical varieties of cultivated oats from the VIR collection 165

GENETICS OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Demurin Ya.N., Rubanova O.A., Meleychuk A.V., Kirov I.V., Kazantsev M.Yu.
Inheritance of defective pollen in F_1 and its effect on the self-fertility in sunflower 180

Shvachko N.A., Semilet T.V., Kovaleva O.N., Lukina K.A., Loskutov I.G.
Application of a genome-wide association study to identify markers associated with valuable agronomic traits in oats 190

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

Abdullaev R.A., Batasheva B.A., Kovaleva O.N., Shchedrina Z.A., Radchenko E.E.
Earliness and photoperiod sensitivity of barley accessions from East Asian countries 204

Arkhestova D.Kh., Khaudov A.D., Kulemina T.V.
Characterization and selection of SSR markers for assessing the genetic diversity of proso millet (*Panicum miliaceum* L.) accessions 217

SYSTEMATICS, PHYLOGENY AND GEOGRAPHY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Torshilova A.A., Ivasenko Zh.V., Titova G.E., Chikida N.N.
Anther and pollen grain development in spontaneous natural *Aegilops*–wheat hybrids (*Aegilops biuncialis* ×*Triticum* sp.) 228

Ulyanovskaya E.V., Bogdanovich T.V., Chernutskaya E.A., Talovina G.V.
Nomenclatural standards for apple-tree cultivars developed at the North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making 238

SURVEYS

Ogudin G.S., Artemyeva A.M.
Alternaria leaf spot and black rot in *Brassica rapa* L.: resistance mechanisms, breeding solutions and prospects 252

Porotnikov I.V., Lukina K.A., Antonova O.Yu., Kovaleva O.N.
Allelic diversity of the barley semidwarfing genes *HvGA20ox2*, *Sln1*, *HvBRI1*, and *HvDep1*: integrating published data and results of the *in silico* pangenome analysis 262

HISTORY OF AGROBIOLOGICAL RESEARCH AND VIR. NAMES OF RENOWN

VIR's Best Books of 2025 277

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 634.12:581.45:[581.132+581.116]
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o9

CC BY

Анализ морфофизиологических показателей листового аппарата видов яблони в Центрально-Черноземном регионе России

М. Л. Дубровский[1], А. В. Шлявас[2], А. В. Кружков[1], Н. Л. Чурикова[1], И. Н. Шамшин[1]

[1] Мичуринский государственный аграрный университет, Мичуринск, Россия

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

Автор, ответственный за переписку: Максим Леонидович Дубровский, element68@mail.ru

Актуальность. Дикорастущие виды рода *Malus* Mill. и их гибриды имеют важное значение как генетические источники устойчивости к болезням и вредителям в селекции сортов и клоновых подвоев яблони. В связи с этим интродуцированные генотипы должны сопровождаться многолетним комплексным изучением для оценки эффективности акклиматизации и возможности дальнейшего использования в селекционном процессе.
Материалы и методы. Материалом для исследования служили 24 образца – дикорастущие виды яблони и полученные на их основе гибриды. Определены основные морфологические и физиологические показатели листьев. Для оценки степени вариабельности изученных признаков рассчитывали коэффициент вариации, соотношение максимальных и минимальных средних арифметических значений.
Результаты. Выявлены существенные различия морфологических и физиологических показателей листового аппарата. Среди морфологических показателей наименьшей изменчивостью характеризовался листовой индекс (C_v = 13,2%), наибольшей – площадь листовых пластинок (C_v = 32,0%). Между соответствующими значениями площади и линейных размеров листовых пластинок отмечены положительные корреляции высокого уровня (R = 0,72…0,93). В течение вегетационного периода значения эффективного квантового выхода фотосистемы II отличались меньшей вариабельностью (C_v = 16,5…37,6%), чем значения устьичной проводимости (C_v = 37,5…50,1%). Не выявлено корреляций высокого и среднего уровня показателей интенсивности фотосинтеза и транспирации во все периоды проведения их измерения. Максимальной стабильностью показателей фотосинтеза и транспирации (C_v < 15%) характеризовались три образца яблони: *M. niedzwetskyana* Dieck (к-29424), *M. sylvestris* (L.) Mill. (к-6144) и гибрид 14-1 (*M. sieboldii* × смесь пыльцы клоновых подвоев).
Заключение. Листовой аппарат изученных образцов яблони характеризуется существенными различиями морфологических и физиологических показателей, которые можно использовать как маркерные признаки для оценки степени гетерогенности видов.

Ключевые слова: дикорастущие виды, генетическая коллекция *Malus* Mill., интродукция, отдаленная гибридизация, межвидовые гибриды, листья, фотосинтез, устьичная транспирация

Благодарности: работа выполнена в рамках государственных заданий: (1) № 1023051100007-2-4.1.1 (FESU-2023-0007) «Разработка инновационных методов получения, анализа и отбора отдаленных гибридов рода *Malus* Mill. и их хозяйственно-биологическая оценка» при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ за счет средств федерального бюджета с использованием оборудования Центра коллективного пользования Мичуринского ГАУ «Селекция сельскохозяйственных культур и технологии производства, хранения и переработки продуктов питания функционального и лечебно-профилактического назначения»; (2) согласно тематическому плану ВИР по проекту № FGEM-2025-0004 «Совершенствование подходов и методов *ex situ* сохранения идентифицированного генофонда вегетативно размножаемых культур и их диких родичей, разработка технологий их эффективного использования в селекции».

Для цитирования: Дубровский М.Л., Шлявас А.В., Кружков А.В., Чурикова Н.Л., Шамшин И.Н. Анализ морфофизиологических показателей листового аппарата видов яблони в Центрально-Черноземном регионе России. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(1):9-20. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o9

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

© Дубровский М.Л., Шлявас А.В., Кружков А.В., Чурикова Н.Л., Шамшин И.Н., 2026

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o9

Analysis of morphophysiological indicators in the leaf apparatus of apple-tree species in the Central Black Earth Region of Russia

Maxim L. Dubrovsky[1], Anna V. Shlyavas[2], Andrey V. Kruzhkov[1], Nataliya L. Churikova[1], Ivan N. Shamshin[1]

[1] *Michurinsk State Agrarian University, Michurinsk, Russia*

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

Corresponding author: Maxim L. Dubrovsky, element68@mail.ru

Background. Wild species of *Malus* Mill. and their hybrids are important as genetic sources of disease and pest resistance in the breeding of apple cultivars and clonal rootstocks. Therefore, introduced genotypes should be accompanied by a long-term comprehensive study to assess the effectiveness of acclimatization and the potential for further utilization in breeding programs.
Materials and methods. The study involved 24 apple-tree accessions – wild species and their hybrids. Main morphological and physiological parameters of leaves were analyzed. To assess the degree of variability of the studied indicators, variation coefficients and ratios of the maximum to minimum arithmetic means were calculated.
Results. Significant differences were found in the morphological and physiological parameters of the leaf apparatus. Among the morphological indicators, the leaf index showed the least variability (C_v = 13.2%), while the leaf blade area showed the greatest span (C_v = 32.0%). Highly positive correlations were observed between the corresponding values of the area and linear dimensions of leaf blades (R = 0.72…0.93). During the growing season, the effective quantum yield of photosystem II showed less variability (C_v = 16.5…37.6%) than stomatal conductance (C_v = 37.5…50.1%). No correlations of high and medium levels were found between the photosynthesis and transpiration intensity rates during any of the measurement periods during the growing season. Three apple-tree genotypes demonstrated maximum stability of photosynthesis and transpiration parameters (C_v < 15%): *M. niedzwetskyana* Dieck (k-29424), *M. sylvestris* (L.) Mill. (k-6144), and hybrid 14-1 (*M. sieboldii* × pollen mixture from apple-tree rootstocks).
Conclusion. The leaf apparatus of the studied apple-tree accessions exhibited significant differences in its morphological and physiological indicators. They can be used as marker traits to assess the degree of the species' heterogeneity.

Keywords: wild species, genetic collection of *Malus* Mill., introduction, distant hybridization, interspecific hybrids, leaves, photosynthesis, stomatal transpiration

Acknowledgments: the work was done within the framework of the state tasks: (1) No. 1023051100007-2-4.1.1 (FESU-2023-0007) "Development of innovative methods for obtaining, analyzing and selecting distant hybrids of the genus *Malus* Mill., and their economic and biological assessment" supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation from the federal budget using the equipment of the Collective Use Center of Michurinsk State Agrarian University "Breeding of Agricultural Crops and Technologies of Production, Storage and Processing of Food Products for Functional Nutrition and for Medicinal and Prophylactic Treatment"; (2) the theme plan of VIR, Project No. FGEM-2025-0004 "Improving the approaches and methods for *ex situ* conservation of the identified genetic diversity of vegetatively propagated crops and their wild relatives, and development of technologies for their effective utilization in plant breeding".

For citation: Dubrovsky M.L., Shlyavas A.V., Kruzhkov A.V., Churikova N.L., Shamshin I.N. Analysis of morphophysiological indicators in the leaf apparatus of apple-tree species in the Central Black Earth Region of Russia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(1):9-20. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o9

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Яблоня является основной плодовой культурой в мире. За значительный исторический период ее выращивания во многих регионах мира сформировался обширный генофонд, представленный сортами, подвоями, элитными формами и гибридами различного происхождения. Если естественная эволюция представителей рода *Malus* Mill. в различных центрах происхождения протекала согласно природным закономерностям, то сортимент яблони и особенности производственного получения ее посадочного материала формировались в соответствии с развитием технологий плодоводства (Budagovsky, 1976; Sedov, 2005, 2007). В настоящее время приоритет в мире принадлежит высокоурожайным интенсивным насаждениям яблони высокой плотности посадки на слаборослых клоновых подвоях, которые характеризуются растениями со сдержанным ростом кроны, что облегчает многие операции ухода за ними и позволяет получать крупные, интенсивно окрашенные плоды.

В Мичуринском государственном аграрном университете (Мичуринский ГАУ) более 80 лет реализуется уникальная комплексная программа селекции зимостойких слаборослых клоновых подвоев яблони (Budagovsky, 1976; Trunov et al., 2020). По состоянию на 2025 г. в Государственном реестре сортов и гибридов сельскохозяйственных растений, допущенных к использованию на территории России, районировано 57 клоновых подвоев яблони, из них 29 – селекции Мичуринского ГАУ (State register…, 2024). Несмотря на значительные успехи в данном направлении, до сих пор нельзя утверждать о получении универсального клонового подвоя для производственных насаждений яблони в мире. Значительные различия эколого-географических условий садоводческих регионов мира, неблагоприятные и слабопрогнозируемые климатические изменения, расширение ареалов основных вредителей и возбудителей болезней плодовых культур не позволяют создать идеальные сорта и клоновые подвои яблони для долгосрочного производства как в глобальном масштабе, так и для территорий конкретных континентов. В связи с этим актуально продолжение селекционных программ с целью получения новых высокоустойчивых и продуктивных сортов и клоновых подвоев яблони. Одним из наиболее эффективных методов селекции является отдаленная гибридизация с использованием лучших образцов мирового генофонда рода *Malus* в качестве источника генов комплекса ценных хозяйственно-биологических признаков (Budagovsky, 1976; Barsukova, 2018).

В результате длительного эволюционного процесса многочисленные виды яблони освоили различные географические и природно-климатические регионы мира, существенно различающиеся по комплексу условий (Langenfeld, 1991). В процессе развития научных ботанических и селекционных исследований, декоративного садоводства оказалась возможной интродукция видов рода *Malus* (Barsukova, 2012, 2018; Ponomarenko V., Ponomarenko K., 2013; Shlyavas, 2017). Если условия новой территории оказываются благоприятными для нормального роста, развития и размножения растения-интродуцента, то его акклиматизация в итоге проходит успешно. При неблагополучных условиях ввезенный видовой образец может погибнуть. Вследствие этого расширение генетических коллекций за счет интродуцируемых видов всегда должно сопровождаться их многолетним комплексным изучением для оценки эффективности акклиматизации и возможности дальнейшего использования в селекционном процессе.

Цель исследования: оценка основных количественных морфофизиологических показателей листового аппарата у видов и межвидовых гибридов яблони при интродукции в Центрально-Черноземный регион России (Тамбовская область).

Материалы и методы

Биологическими объектами исследования служили дикорастущие виды яблони различного генетического и эколого-географического происхождения и полученные на их основе гибриды – 23 образца из полевой коллекции Майкопской опытной станции – филиала ВИР и 1 гибридный сеянец селекции Мичуринского государственного аграрного университета. Образцы генетической коллекции видовых и гибридных форм яблони являются, согласно системе В. Г. Лангенфельда (Langenfeld, 1991), представителями четырех секций: *Gymnomeles* Koehne – Ягодные яблони; *Sorbomalus* Zabel – Рябиновидные яблони; *Chloromeles* (Decne.) Rehder – Зеленоплодные яблони; *Malus* Langenf. – Настоящие яблони.

На территории Тамбовской области, входящей в состав Центрально-Черноземного региона России, все изучаемые образцы являются интродуцентами (табл. 1).

Все изучаемые образцы в августе 2019 г. были размножены в питомнике Мичуринского ГАУ методом окулировки на клоновом подвое 54-118, а затем, весной 2022 г., двухлетними саженцами высажены в коллекционно-гибридный сад для дальнейшего изучения и использования в селекционных программах в качестве родительских форм. Каждый образец представлен тремя растениями, возделываемыми на территории городского округа г. Мичуринска Тамбовской области.

Исследования проводились в 2023–2025 гг. в Мичуринском ГАУ. При возделывании растений в саду провели стандартные агротехнические мероприятия (систематическое механизированное культивирование почвы дискатором в междурядиях, окашивание травы в приствольных полосах в ряду без использования гербицидов). Почва опытного поля – выщелоченный среднемощный чернозем со средним содержанием гумуса 4,7–5,0%. Минеральные и органические удобрения не использовали, исключив фактор дополнительного питания растений.

Среди морфологических показателей листьев у изучаемой коллекции анализировали длину, ширину и площадь листовой пластинки, а также листовой индекс. Для этого собранные в конце июля листья в количестве 50 шт. с каждого образца сканировали на планшетном сканере при одинаковом разрешении, а затем полученные файлы изображений открывали в графическом редакторе ImageJ, в котором после проведения их бинаризации и загрузки профиля масштабирования получали расчетную таблицу показателей. Листовой индекс (индекс формы листа) определяли как отношение длины к ширине листовой пластинки.

Среди основных физиологических показателей, отражающих функциональную активность растений яблони в период вегетации, анализировали эффективный квантовый выход фотосистемы II (*φPSII*) и устьичную проводимость (*Gsw*) с помощью порометра-хлорофиллфлуориметра LI-COR LI-600PF (LI-COR, США), позволяющего одновременно измерять оба параметра на листовых пластинках. Для изучения динамики показателей интенсивности фотосинтеза и транспирации проводили три серии

Таблица 1. Характеристика изучаемых образцов генетической коллекции видовых и гибридных форм яблони Мичуринского государственного аграрного университета

Table 1. Characteristics of the studied accessions from the genetic collection of apple-tree species and hybrid forms maintained at Michurinsk State Agrarian University

Образец, номер каталога ВИР / Accession, VIR catalogue No.	Видовая принадлежность образца по системе В. Г. Лангенфельда / Species affiliation of the accession according to V. G. Langenfeld's system	Природный ареал / Area of natural distribution	Источник получения образца / Origin of the accession
Sectio *Gymnomeles* Koehne – Ягодные яблони			
Яблоня ягодная (сибирская) – *Malus baccata* (L.) Borkh., к-2319	*Malus baccata* (L.) Borkh.	Восточная Сибирь, Забайкалье, Дальний Восток	Майкопская опытная станция – филиал ВИР
Я. Палласа – *M. pallasiana* Juz., к-14957A	*M. baccata* f. *baccata* Rehder	Восточная Сибирь, Дальний Восток, Китай	-//-
Я. маньчжурская – *M. mandshurica* (Maxim.) Kom., к-41277	*M. mandshurica* (Maxim.) Kom.	Дальний Восток	-//-
Я. хубейская – *M. hupehensis* (Pamp.) Rehder, к-43206	*M. hupehensis* (Pamp.) Rehder	Китай, Бирма, Индия	-//-
Я. вишнеплодная, разновидность золотая – *M. × cerasifera* var. *aurantiaca* Spach, к-2314 (*M. × prunifolia* (Juz.) Langenf. *× M. baccata*)	M. × cerasifera Spach	Центральная Азия, Восточная Европа	-//-
Я. мощная – *M. × robusta* (Carr.) Rehder, к-43198 (*M. baccata × M. × prunifolia*)	*M. × robusta* (Carr.) Rehder	Северный Китай	-//-
Sectio *Sorbomalus* Zabel – Рябиновидные яблони			
Я. Зибольда – *M. sieboldii* (Regel) Rehder × Спартан, к-41289	–	–*	-//-
Гибрид 14-1 (*M. sieboldii* × смесь пыльцы клоновых подвоев яблони)	–	–*	Мичуринский ГАУ
Я. Цуми – *M. × zumi* (Matsum.) Rehder, к-41272 (*M. mandshurica* × *M. sieboldii*)	*M. × zumi* (Matsum.) Rehder	Япония, США	Майкопская опытная станция – филиал ВИР
Я. Шейдеккера – *M. × sheideckeri* Zabel, к-2407 (*M. × floribunda* Siebold *× M. × prunifolia*)	*M. × sheideckeri* Zabel	–*	-//-
Sectio *Chloromeles* (Decne.) Rehder – Зеленоплодные яблони			
Я. венечная – *M. coronaria* (L.) Mill., к-2336	*M. coronaria* (L.) Mill.	Северная Америка	-//-
Я. айовская – *M. ioensis* (Wood) Britt., к-2352	*M. ioensis* (Wood) Britt.	Северная Америка (центр США)	-//-

Таблица 1. Окончание

Table 1. The end

Образец, номер каталога ВИР / Accession, VIR catalogue No.	Видовая принадлежность образца по системе В. Г. Лангенфельда / Species affiliation of the accession according to V. G. Langenfeld's system	Природный ареал / Area of natural distribution	Источник получения образца / Origin of the accession
Sectio *Malus* Langenf. – Настоящие яблони			
Я. Недзвецкого – *M. niedzwetzkyana* Dieck, к-2389	*M. sieversii* f. *niedzwetzkyana* (Dieck) Langenf.	Средняя Азия (Китай – регион Тянь-Шань)	-//-
Я. Недзвецкого – *M. niedzwetzkyana* Dieck, к-29424	-//-	Средняя Азия (Китай – регион Тянь-Шань)	-//-
Я. пурпурная, разновидность Элея – *M.* × *purpurea* var. *eleyi* (Bean) Rehder, к-2394	не представлен	–*	-//-
Я. пурпурная, плакучая форма – *M.* × *purpurea* f. *pendula* (Bean) Rehder, к-2396	не представлен	–*	-//-
Я. Сиверса – *M. sieversii* (Ledeb.) M.J. Roem., к-13275	M. sieversii (Ledeb.) M. J. Roem.	Средняя Азия, Казахстан	-//-
Я. кашмирская – *M. caspiriensis* Langenf., к-14943	*M. caspiriensis* Langenf.	Китай (регион Западные Гималаи)	-//-
Я. туркменов – *M. turkmenorum* Juz. et M. Pop., к-13283	*M. orientalis* subsp. *turkmenorum* (Juz. et M. Pop.) Langenf.	Средняя Азия	-//-
Я. восточная – *M. orientalis* (Uglitz.) Juz., к-2339	*M. orientalis* (Uglitz.) Juz.	Кавказ, Малая Азия	-//-
Я. восточная – *M. orientalis* 74-10, к-29483	-//-	Кавказ	-//-
Я. сливолистная (китайская) – *M.* × *prunifolia* (Juz.) Langenf., к-2380	*M.* × *prunifolia* (Juz.) Langenf.	Китай	-//-
Я. лесная – *M. sylvestris* (L.) Mill., к-6144	*M. sylvestris* (L.) Mill.	Центральная и Восточная Европа, Передняя Азия	-//-
Я. азиатская, разновидность Ринго, пирамидальная ремонтантная форма – *M. asiatica* var. *ringo* f. *fastigiata bifera*, к-2343	*M. asiatica* var. *rinki* Asami	Китай, Корея	-//-

Примечание: * – искусственно полученный гибрид, в природе не встречается

Note: * – an artificially obtained hybrid that does not occur in natural environments

измерений: в начале вегетации растений (первая декада июня), в середине вегетации (третья декада июля) и перед окончанием вегетации (первая декада сентября), а затем на основании полученных данных рассчитывали среднее значение соответствующего параметра за вегетационный период и коэффициент его вариации.

Все полученные значения количественных показателей обработаны общепринятыми методами математической статистики (Dospekhov, 1985) с использованием программной вычислительной среды Microsoft Office Excel 2016 и Statistica 10.0. Для оценки степени вариабельности изученных признаков рассчитывали коэффициент вариации, а также соотношение максимальных и минимальных (max/min) средних арифметических значений, выделенных жирным шрифтом в соответствующих таблицах.

Результаты и обсуждение

Результаты интродукции и последующей акклиматизации исходных форм яблони имеют большое значение для планирования и успешного проведения селекционного процесса. Наиболее устойчивые формы могут стать источниками ценных генов и принять участие в получении значительного количества растительного материала для дальнейшего искусственного отбора.

Настоящее исследование включает 24 образца яблони, однако исходное количество образцов видов в коллекции было более многочисленным. В процессе интродукции в условиях Тамбовской области сохранились не все изначально высаженные в коллекционно-гибридный сад дикорастущие образцы яблони: в течение 2024–2025 гг. после повреждений зимнего периода погибли растения сибирской ягодной яблони *M. baccata* (к-2333); обильноцветущей *M.* × *floribunda* Siebold (к-2346); низкой, или карликовой *M. pumila* Mill. (к-2383); пурпурной *M.* × *purpurea* (Bean) Rehder (к-2392). Очевидно, данные образцы оказались восприимчивы к возвратным морозам, наступившим сразу после оттепелей, в связи с чем их дальнейший рост и развитие оказались невозможными в условиях Центрально-Черноземного региона.

Среди морфологических показателей листьев изученных образцов наибольшей изменчивостью характеризовалась площадь листовых пластинок – различие между минимальным и максимальным средним значением у генотипов составило 3,4 раза, коэффициент вариации равен 32,0% (табл. 2). В качестве показателя с наиболее стабильными значениями отмечен листовой индекс (C_v = 13,2%), при этом различие его средних значений составило 1,8 раза – от 1,28 ± 0,09 единиц у *M. sylvestris* (L.) Mill. (к-6144) до 2,35 ± 0,12 у *M. orientalis* (Uglitz.) Juz. (к-29483). При анализе гибридного потомства, полученного с участием дикорастущих видов яблони, можно использовать данные показатели как маркерные фенотипические признаки для оценки степени его гетерогенности.

Таблица 2. Морфологические показатели листьев у изучаемых образцов яблони
Table 2. Morphological leaf indicators of the studied apple-tree accessions

Образец, номер каталога ВИР / Accession, VIR catalogue No.	Площадь листовой пластинки, см² / Leaf blade area, cm²	Длина листовой пластинки, см / Leaf blade length, cm	Ширина листовой пластинки, см / Leaf blade width, cm	Листовой индекс / Leaf index
Sectio *Gymnomeles* Koehne				
Malus baccata, к-2319	23,61 ± 1,92	7,79 ± 0,75	4,27 ± 0,15	1,82 ± 0,17
M. pallasiana., к-14957A	17,85 ± 0,85	7,52 ± 0,37	3,44 ± 0,19	2,20 ± 0,10
M. mandshurica, к-41277	20,93 ± 1,42	6,49 ± 0,37	4,48 ± 0,16	1,46 ± 0,10
M. hupehensis, к-43206	14,64 ± 1,80	6,19 ± 0,45	3,26 ± 0,18	1,90 ± 0,07
M. × *cerasifera* var. *aurantiaca*, к-2314	15,89 ± 1,20	6,71 ± 0,29	3,65 ± 0,16	1,84 ± 0,03
M. × *robusta*, к-43198	14,27 ± 0,55	5,68 ± 0,35	3,48 ± 0,17	1,66 ± 0,14
Sectio *Sorbomalus* Zabel				
M. sieboldii × Спартан, к-41289	22,85 ± 2,42	7,78 ± 0,61	4,10 ± 0,19	1,89 ± 0,08
Гибрид 14-1	22,95 ± 0,46	8,02 ± 0,32	4,19 ± 0,08	1,92 ± 0,10
M. × *zumi*., к-41272	15,79 ± 0,84	6,53 ± 0,27	3,24 ± 0,31	2,06 ± 0,14
M. × *sheideckeri*, к-2407	16,10 ± 0,63	6,48 ± 0,16	3,65 ± 0,28	1,81 ± 0,12
Sectio *Chloromeles* (Decne.) Rehder				
M. coronaria, к-2336	14,09 ± 1,48	5,67 ± 0,50	3,42 ± 0,14	1,66 ± 0,16
M. ioensis, к-2352	33,57 ± 3,13	8,66 ± 0,42	5,38 ± 0,50	1,64 ± 0,09

Таблица 2. окончание
Table 2. The end

Образец, номер каталога ВИР / Accession, VIR catalogue No.	Площадь листовой пластинки, см² / Leaf blade area, cm²	Длина листовой пластинки, см / Leaf blade length, cm	Ширина листовой пластинки, см / Leaf blade width, cm	Листовой индекс / Leaf index
Sectio *Malus* Langenf.				
M. niedzwetzkyana, к-2389	17,47 ± 1,33	6,65 ± 0,63	3,70 ± 0,09	1,80 ± 0,18
M. niedzwetzkyana, к-29424	16,57 ± 0,70	6,43 ± 0,26	4,16 ± 0,20	1,55 ± 0,03
M. × purpurea var. *eleyi*, к-2394	11,37 ± 0,37	5,77 ± 0,23	2,97 ± 0,06	1,95 ± 0,09
M. × purpurea f. *pendula*, к-2396	16,68 ± 1,65	6,76 ± 0,35	3,60 ± 0,18	1,88 ± 0,08
M. sieversii, к-13275	10,47 ± 1,17	4,84 ± 0,40	2,92 ± 0,22	1,68 ± 0,15
M. caspiriensis, к-14943	17,20 ± 1,20	6,25 ± 0,27	3,79 ± 0,09	1,65 ± 0,06
M. turkmenorum, к-13283	11,29 ± 1,14	5,57 ± 0,22	2,83 ± 0,16	1,99 ± 0,12
M. orientalis, к-2339	12,44 ± 1,13	4,99 ± 0,27	3,37 ± 0,17	1,48 ± 0,06
M. orientalis 74-10, к-29483	9,87 ± 0,61	5,71 ± 0,14	2,44 ± 0,07	2,35 ± 0,12
M. × prunifolia, к-2380	14,79 ± 1,07	5,92 ± 0,52	3,40 ± 0,19	1,74 ± 0,10
M. sylvestris, к-6144	11,59 ± 0,97	4,34 ± 0,22	3,44 ± 0,22	1,28 ± 0,09
M. asiatica var. *ringo fastigiata bifera*, к-2343	14,66±1,04	6,09±0,36	3,45±0,12	1,77±0,11
Статистические показатели в изучаемой генетической коллекции / Statistical indicators in the studied genetic collection				
Вариабельность значений показателя (max/min), раз / Variability of the indicator values (max/min), times	3,4	2,0	2,2	1,8
Среднее арифметическое значение и его ошибка / Arithmetic mean and its error (M ± m)	16,54 ± 1,08	6,37 ± 0,21	3,61 ± 0,12	1,79 ± 0,05
Дисперсия показателя / Variance of the indicator (σ^2)	27,94	1,08	0,37	0,06
Коэффициент вариации / Coefficient of variation (C_v), %	32,0	16,3	16,9	13,2

У изучаемых образцов яблони между соответствующими значениями показателей площади и линейных размеров листовых пластинок отмечены положительные корреляции высокого уровня: длины – 0,89, ширины – 0,93, при этом коэффициент корреляции длины и ширины листовых пластинок оказался равен 0,72. Статистическая взаимосвязь площади и линейных размеров листовых пластинок часто используется для быстрой оценки листовой поверхности без сканирования листьев (Sala et al., 2015). При этом между листовым индексом и площадью листовых пластинок отмечена отрицательная корреляция низкого уровня (R = –0,10).

Фотосинтез и транспирация являются основными физиологическими процессами любого растительного организма, поэтому любые их отклонения от нормы свидетельствуют об изменении функциональной активности генотипа и могут являться диагностическими показателями.

У изученных образцов яблони из четырех секций среднее значение эффективного квантового выхода второй фотосистемы (ФС II), отражающего удельную фотосинтетическую активность листьев, за весь вегетационный период отмечено на уровне 0,678 ± 0,023 относительных единиц при коэффициенте вариации 16,6%. Значения данного показателя в изучаемой коллекции при измерении в начале, середине и по окончании вегетации растений изменялись в 2,3–3,8 раза (табл. 3).

Среднее за сезон значение устьичной проводимости составило 0,252 ± 0,016 ммоль $м^2$ $с^{-1}$ при 3,8-кратном различии показателя в выборке и коэффициенте вариации на уровне 30,9% (табл. 4). В начале вегетации вариабельность значений устьичной проводимости, отражающей

Таблица 3. **Динамика удельной фотосинтетической активности изучаемых образцов яблони за вегетационный период**

Table 3. **Dynamics of specific photosynthetic activity in the studied apple-tree accessions during the growing season**

Образец, номер каталога ВИР / Accession, VIR catalogue No.	Эффективный квантовый выход фотосистемы II (*φPSII*), относительные единицы / Effective quantum yield of photosystem II (*φPSII*), relative units			
	начало вегетации / start of the growing season	середина вегетации / middle of the growing season	окончание вегетации / end of the growing season	среднее за период вегетации / mean for the growing season
Sectio *Gymnomeles* Koehne				
Malus baccata, к-2319	0,716 ± 0,010	0,640 ± 0,017	0,725 ± 0,021	0,694 ± 0,027
M. pallasiana, к-14957A	0,580 ± 0,071	0,693 ± 0,036	0,765 ± 0,005	0,679 ± 0,054
M. mandshurica, к-41277	0,459 ± 0,054	0,735 ± 0,016	0,550 ± 0,050	0,581 ± 0,081
M. hupehensis, к-43206	0,623 ± 0,058	0,780 ± 0,006	0,765 ± 0,009	0,723 ± 0,050
M. × cerasifera var. *aurantiaca*, к-2314	0,320±0,109	0,747 ± 0,009	0,678 ± 0,013	0,579±0,131
M. × robusta, к-43198	0,580 ± 0,071	0,693 ± 0,036	0,765 ± 0,005	0,679 ± 0,054
Sectio *Sorbomalus* Zabel				
M. sieboldii Спартан, к-41289	0,590 ± 0,077	0,618 ± 0,073	0,728 ± 0,013	0,645 ± 0,042
Гибрид 14-1	0,683 ± 0,014	0,538 ± 0,112	0,688 ± 0,073	0,636 ± 0,049
M. × zumi, к-41272	0,697 ± 0,011	0,565 ± 0,068	0,210 ± 0,046	0,491 ± 0,145
M. × sheideckeri, к-2407	0,719 ± 0,012	0,705 ± 0,009	0,733 ± 0,010	0,719 ± 0,008
Sectio *Chloromeles* (Decne.) Rehder				
M. coronaria, к-2336	0,420 ± 0,089	0,670 ± 0,012	0,693 ± 0,058	0,594 ± 0,087
M. ioensis, к-2352	0,727 ± 0,028	1,990 ± 1,338	0,698 ± 0,029	1,138 ± 0,426
Sectio *Malus* Langenf.				
M. niedzwetzkyana, к-2389	0,610 ± 0,059	0,673 ± 0,068	0,663 ± 0,061	0,648 ± 0,019
M. niedzwetzkyana, к-29424	0,690 ± 0,022	0,743 ± 0,006	0,615 ± 0,068	0,683 ± 0,037
M. × purpurea var. *eleyi*, к-2394	0,483 ± 0,071	0,750 ± 0,007	0,740 ± 0,015	0,658 ± 0,087
M. × purpurea f. *pendula*, к-2396	0,619 ± 0,031	0,740 ± 0,013	0,768 ± 0,009	0,709 ± 0,046
M. sieversii, к-13275	0,676 ± 0,050	0,730 ± 0,014	0,708 ± 0,009	0,704 ± 0,016
M. caspiriensis, к-14943	0,699 ± 0,011	0,738 ± 0,003	0,730 ± 0,039	0,722 ± 0,012
M. turkmenorum, к-13283	0,550 ± 0,061	0,740 ± 0,009	0,730 ± 0,030	0,673 ± 0,062
M. orientalis, к-2339	0,651 ± 0,027	0,533 ± 0,101	0,725 ± 0,012	0,636 ± 0,056
M. orientalis 74-10, к-29483	0,623 ± 0,014	0,528 ± 0,019	0,692 ± 0,007	0,614 ± 0,048
M. × prunifolia, к-2380	0,623 ± 0,058	0,780 ± 0,006	0,765 ± 0,009	0,723 ± 0,050
M. sylvestris, к-6144	0,550 ± 0,075	0,668 ± 0,021	0,738 ± 0,013	0,652 ± 0,055
M. asiatica var. *ringo fastigiata bifera*, к-2343	0,652 ± 0,021	0,727 ± 0,015	0,715 ± 0,006	0,698 ± 0,023
Статистические показатели в изучаемой генетической коллекции / Statistical indicators in the studied genetic collection				
Вариабельность значений показателя (max/min), раз / Variability of the indicator values (max/min), times	2,3	3,8	3,7	2,3
Среднее арифметическое значение и его ошибка / Arithmetic mean and its error (M ± m)	0,606 ± 0,021	0,739 ± 0,057	0,691 ± 0,023	0,678 ± 0,023
Дисперсия показателя / Variance of the indicator (σ^2)	0,010	0,077	0,013	0,013
Коэффициент вариации / Coefficient of variation (C_v), %	16,9	37,6	16,5	16,6

Таблица 4. **Динамика устьичной проводимости у изучаемых образцов яблони за вегетационный период**
Table 4. **Dynamics of stomatal conductance in the studied apple-tree accessions during the growing season**

Образец, номер каталога ВИР / Accession, VIR catalogue No.	Устьичная проводимость (*Gsw*), ммоль·м^2·с$^{-1}$ / Stomatal conductance (*Gsw*), mmol·m^2·s^{-1}			
	начало вегетации / start of the growing season	середина вегетации / middle of the growing season	окончание вегетации / end of the growing season	среднее за период вегетации / mean for the growing season
Sectio *Gymnomeles* Koehne				
Malus baccata, к-2319	0,174 ± 0,021	0,315 ± 0,029	0,128 ± 0,009	0,206 ± 0,056
M. pallasiana, к-14957A	0,438 ± 0,049	0,364 ± 0,027	0,269 ± 0,038	0,357 ± 0,049
M. mandshurica, к-41277	0,567 ± 0,115	0,338 ± 0,036	0,236 ± 0,009	0,380 ± 0,098
M. hupehensis, к-43206	0,222 ± 0,021	0,440 ± 0,065	0,032 ± 0,012	0,231 ± 0,118
M. × cerasifera var. *aurantiaca*, к-2314	0,338 ± 0,021	0,224 ± 0,023	0,177 ± 0,027	0,246 ± 0,048
M. × robusta, к-43198	0,005 ± 0,002	0,185 ± 0,014	0,121 ± 0,006	0,104 ± 0,053
Sectio *Sorbomalus* Zabel				
M. sieboldii Спартан, к-41289	0,143 ± 0,035	0,157±0,030	0,205 ± 0,033	0,168 ± 0,019
Гибрид 14-1	0,432 ± 0,077	0,393 ± 0,087	0,342 ± 0,051	0,389 ± 0,026
M. × zumi, к-41272	0,164 ± 0,017	0,163 ± 0,018	0,252 ± 0,061	0,193 ± 0,030
M. × sheideckeri, к-2407	0,196 ± 0,016	0,297 ± 0,024	0,445 ± 0,062	0,313 ± 0,072
Sectio *Chloromeles* (Decne.) Rehder				
M. coronaria, к-2336	0,378 ± 0,062	0,086 ± 0,033	0,147 ± 0,017	0,204 ± 0,089
M. ioensis, к-2352	0,047 ± 0,006	0,411 ± 0,056	0,079 ± 0,009	0,179 ± 0,116
Sectio *Malus* Langenf.				
M. niedzwetzkyana, к-2389	0,261 ± 0,023	0,261 ± 0,025	0,089 ± 0,009	0,204 ± 0,057
M. niedzwetzkyana, к-29424	0,348 ± 0,048	0,343 ± 0,063	0,285 ± 0,092	0,325 ± 0,020
M. × purpurea var. *eleyi*, к-2394	0,120 ± 0,031	0,142 ± 0,030	0,156 ± 0,025	0,139 ± 0,010
M. × purpurea f. *pendula*, к-2396	0,310 ± 0,051	0,303 ± 0,011	0,218 ± 0,035	0,277 ± 0,030
M. sieversii, к-13275	0,405 ± 0,048	0,277 ± 0,061	0,152 ± 0,022	0,278 ± 0,073
M. caspiriensis, к-14943	0,338 ± 0,021	0,224 ± 0,023	0,172 ± 0,026	0,245 ± 0,049
M. turkmenorum, к-13283	0,122 ± 0,020	0,299 ± 0,073	0,221 ± 0,040	0,214 ± 0,051
M. orientalis, к-2339	0,315 ± 0,023	0,351 ± 0,042	0,193 ± 0,057	0,286 ± 0,048
M. orientalis 74-10, к-29483	0,348 ± 0,017	0,375 ± 0,024	0,234 ± 0,035	0,319± 0,043
M. × prunifolia, к-2380	0,353 ± 0,069	0,528 ± 0,052	0,118 ± 0,011	0,333 ± 0,119
M. sylvestris, к-6144	0,177 ± 0,021	0,137 ± 0,024	0,156 ± 0,019	0,157 ± 0,012
M. asiatica var. *ringo fastigiata bifera*, к-2343	0,362 ± 0,026	0,319 ± 0,035	0,200 ± 0,028	0,294 ± 0,048
Статистические показатели в изучаемой генетической коллекции / Statistical indicators in the studied genetic collection				
Вариабельность значений показателя (max/min), раз / Variability of the indicator values (max/min), times	113,4	6,1	13,9	3,8
Среднее арифметическое значение и его ошибка / Arithmetic mean and its error (M ± m)	0,273 ± 0,028	0,289 ± 0,022	0,193 ± 0,018	0,252 ± 0,016
Дисперсия показателя / Variance of the indicator (σ^2)	0,019	0,012	0,008	0,006
Коэффициент вариации / Coefficient of variation (C_v), %	50,1	37,5	46,0	30,9

интенсивность транспирации листового аппарата растений, составила максимальное значение за время проведения измерения – увеличилась в 113,4 раза (C_v = 50,1%), в середине вегетации – в 6,1 раза (C_v = 37,5%), а по окончании ростовых процессов растений – в 13,9 раза (C_v = 46,0%) (см. табл. 4). Увеличенная изменчивость показателя устьичной проводимости у представленных видов рода *Malus* в первый месяц вегетации частично может быть связана с повреждениями растений в результате зимней оттепели в январе 2024 и 2025 г. и последующего быстрого снижения температуры.

В целом среди изученных образцов в течение вегетационного периода меньшей вариабельностью (C_v = 16,5…37,6%) отличались значения эффективного квантового выхода фотосистемы II, чем устьичной проводимости (C_v = 37,5…50,1%) (табл. 5).

Таблица 5. Коэффициенты вариации показателей фотосинтеза и транспирации у изучаемых образцов яблони в течение вегетационного периода

Table 5. Coefficients of variation for the photosynthesis and transpiration indicators in the studied apple-tree accessions during the growing season

Образец, номер каталога ВИР / Accession, VIR catalogue No.	Коэффициенты вариации / Coefficients of variation, (C_v) %:	
	эффективного квантового выхода ФС II / for the effective quantum yield of PS II (*φPSII*)	устьичной проводимости / for stomatal conductance (*Gsw*)
Sectio *Gymnomeles* Koehne		
Malus baccata, к-2319	6,7	47,4
M. pallasiana, к-14957A	13,7	23,7
M. mandshurica, к-41277	24,2	44,6
M. hupehensis, к-43206	12,0	88,3
M. × cerasifera var. *aurantiaca*, к-2314	39,4	33,6
M. × robusta, к-43198	13,7	88,0
Sectio *Sorbomalus* Zabel		
M. sieboldii × Спартан, к-41289	11,3	19,3
Гибрид 14-1	13,4	11,6
M. × zumi, к-41272	51,3	26,5
M. sheideckeri, к-2407	1,9	40,1
Sectio *Chloromeles* (Decne.) Rehder		
M. coronaria, к-2336	25,5	75,6
M. ioensis, к-2352	64,8	112,6
Sectio *Malus* Langenf.		
M. niedzwetzkyana, к-2389	5,2	48,8
M. niedzwetzkyana, к-29424	9,4	10,8
M. × purpurea var. *eleyi*, к-2394	23,0	13,0
M. × purpurea f. *pendula*, к-2396	11,2	18,5
M. sieversii, к-13275	3,9	45,5
M. caspiriensis Langenf., к-14943	2,9	34,7
M. turkmenorum, к-13283	15,9	41,5
M. orientalis, к-2339	15,2	28,9
M. orientalis 74-10, к-29483	13,4	23,5
M. × prunifolia, к-2380	12,0	61,8
M. sylvestris, к-6144	14,6	12,8
M. var. *ringo* f. *fastigiata bifera*, к-2343	5,8	28,6
Изменчивость значений коэффициента вариации, раз / Variability in the values of the coefficient of variation, times	34,1	10,4

Как правило, у многих видов растений, в том числе яблони, транспирация определяется степенью открытия устьиц в эпидермальной ткани листьев и служит одним из способов эффективной регуляции водообмена, особенно в условиях почвенно-атмосферной засухи (Bassett, 2013). У засухоустойчивых видов яблони транспирация листьев при стрессе снижается, а при использовании их сеянцев в качестве семенных подвоев для сортов рост и развитие привойного компонента в засушливых условиях ингибируется в меньшей степени, чем в случае неустойчивых подвойных сеянцев (Liu et al., 2012).

У изучаемых видов яблони в условиях коллекционно-гибридного сада среди соответствующих значений показателей интенсивности фотосинтеза и транспирации во все периоды проведения их измерения не выявлено корреляций высокого и среднего уровня: в начале вегетации R = –0,18; в середине вегетации R = 0,26; по окончании вегетации R = –0,21; в среднем за вегетационный период R = –0,13. Максимальная положительная корреляция значений эффективного квантового выхода фотосистемы II у изучаемых образцов яблони отмечена при их измерении в середине вегетации и среднего арифметического за вегетационный период (R = 0,91), а показателя устьичной проводимости – при измерении в начале вегетации растений и среднего значения за весь сезон (R = 0,84).

Генетическая коллекция, представленная 23 интродуцированными видами рода *Malus* и межвидовым гибридом селекции Мичуринского ГАУ, требует дальнейшего изучения, однако следует отметить, что у некоторых форм физиологические показатели характеризуются значительной изменчивостью, что свидетельствует о неблагоприятных для растений почвенно-климатических условиях.

У изучаемых образцов максимальной стабильностью показателей фотосинтеза и транспирации (C_v < 15% в течение всего вегетационного периода) характеризовались три образца яблони: *M. niedzwetskyana* Dieck (к-29424), *M. sylvestris* (к-6144) и гибрид 14-1 (см. табл. 5).

Заключение

В результате исследований выявлены существенные различия морфологических и физиологических показателей листового аппарата у 24 образцов рода *Malus*.

Среди морфологических показателей наименьшей изменчивостью характеризовался листовой индекс (C_v = 13,2%), наибольшей – площадь листовых пластинок (C_v = 32,0%). Между соответствующими значениями площади и линейными размерами листовых пластинок отмечены положительные корреляции высокого уровня: длины – 0,89, ширины – 0,93; коэффициент корреляции показателей длины и ширины листовых пластинок равен 0,72.

В целом у всех изучаемых образцов яблони в течение вегетационного периода значения эффективного квантового выхода фотосистемы II отличались меньшей вариабельностью (C_v = 16,5…37,6%), чем значения устьичной проводимости (C_v = 37,5…50,1%). Не выявлено корреляций высокого и среднего уровня среди соответствующих значений показателей интенсивности фотосинтеза и транспирации во все периоды проведения их измерения. Максимальной стабильностью показателей фотосинтеза и транспирации (C_v < 15% в течение всего вегетационного периода) характеризовались три образца яблони: *M. niedzwetzkyana* (к-29424), *M. sylvestris* (к-6144) и гибрид 14-1.

В дальнейшем при анализе гибридного потомства, полученного с участием дикорастущих видов яблони, можно использовать морфологические и физиологические показатели как маркерные признаки для оценки степени его гетерогенности.

References / Литература

Barsukova O.N. Atlas. Gene pool of wild apple species (Atlas. Genofond dikorastushchikh vidov yabloni). Maikop; 2012. [in Russian] (Барсукова О.Н. Атлас. Генофонд дикорастущих видов яблони. Майкоп; 2012).

Barsukova O.N. Composition of the collection of wild apple-tree species and its prospects for use in breeding. *Proceedings on Applied botany, Genetics and Breeding*. 2018;179(3):95-103. [in Russian] (Барсукова О.Н. Состав коллекции дикорастущих видов яблони и перспективы использования ее в селекции. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2018;179(3):95-103). DOI: 10.30901/2227-8834-2018-3-95-103

Bassett C.L. Water use and drought response in cultivated and wild apples. In: K. Vahdati, C. Leslie (eds). *Abiotic Stress – Plant Responses and Applications in Agriculture*. Rijeka: InTech; 2013. p.249-275. DOI: 10.5772/55537

Budagovsky V.I. Cultivation of dwarf fruit trees (Kultura slaboroslykh plodovykh derevyev). Moscow: Kolos; 1976. [in Russian] (Будаговский В.И. Культура слаборослых плодовых деревьев. Москва: Колос; 1976).

Dospekhov B.A. Methodology of field trial (with fundamentals of statistical processing of research results) (Metodika polevogo opyta [s osnovami statisticheskoy obrabotki rezultatov 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).

Langenfeld V.T. Apple-trees: morphological evolution, phylogeny, and systematics of the genus. Riga: Zinātne; 1991. [in Russian] (Лангенфельд В.Т. Яблоня. Морфологическая эволюция, филогения, география, систематика. Рига: Зинатне; 1991).

Liu B.H., Cheng L., Liang D., Zou Y.J., Ma F.W. Growth, gas exchange, water-use efficiency, and carbon isotope composition of 'Gale Gala' apple trees grafted onto 9 wild Chinese rootstocks in response to drought stress. *Photosynthetica*. 2012;50(3):401-410. DOI: 10.1007/s11099-012-0048-0

Ponomarenko V.V., Ponomarenko K.V. The gene pool of *Malus* Mill. spp. Apple tree: biology, morphology, ecology, systematics, and source material (Genofond vidov roda *Malus* Mill. Yablonya: biologiya, morfologiya, ekologiya, sistematika, iskhodny material). St. Petersburg; 2013. [in Russian] (Пономаренко В.В., Пономаренко К.В. Генофонд видов рода *Malus* Mill. Яблоня: биология, морфология, экология, систематика, исходный материал. Санкт-Петербург; 2013).

Sala F., Arsene G.G., Iordănescu O., Boldea M. Leaf area constant model in optimizing foliar area measurement in plants: A case study in apple tree. *Scientia Horticulturae*. 2015;193:218-224. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.07.008

Sedov E.N. Apple breeding history, goals, methods and results. *Agricultural Biology*. 2007;42(1):3-15. [in Russian] (Седов Е.Н. История, задачи, методы и результаты селекции яблони. *Сельскохозяйственная биология*. 2007;42(1):3-15).

Sedov E.N. (ed.). Pomology: In 5 volumes. Vol. 1. Apple tree (Pomologiya: V 5-ti tomakh. T. 1. Yablonya). Orel: VNIISPK;

2005. [in Russian] (Помология: В 5-ти томах, Т. I. Яблоня / под ред. Е.Н. Седова. Орел: ВНИИСПК; 2005).

Shlyavas A.V. The collection of apple (*Malus* Mill.) genetic resources of the Federal Research Center the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources. *Plant Biology and Horticulture: Theory, Innovation*. 2017;144-1:79-83. [in Russian] (Шлявас А.В. Коллекция генетических ресурсов яблони (*Malus* Mill.) ФГБНУ ФИЦ Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. *Биология растений и садоводство: теория, инновации*. 2017;144-1:79-83).

State register of varieties and hybrids of agricultural plants admitted for usage (national list): official publication. Moscow; Rosinformagrotekh; 2024. [in Russian] (Государственный реестр сортов и гибридов сельскохозяйственных растений, допущенных к использованию: официальное издание. Москва: Росинформагротех; 2024).

Trunov Yu.V., Soloviev A.V., Papikhin R.V., Dubrovsky M.L., Shamshin I.N. Perspective apple clonal rootstocks for intensive orchards. *Horticulture and Viticulture*. 2020;(2):34-40. [in Russian] (Трунов Ю.В., Соловьев А.В., Папихин Р.В., Дубровский М.Л., Шамшин И.Н. Перспективные клоновые подвои яблони для интенсивных садов. *Садоводство и виноградарство*. 2020;(2);34-40). DOI: 10.31676/0235-2591-2020-2-34-40

Информация об авторах

Максим Леонидович Дубровский, кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией, Мичуринский государственный аграрный университет, 393760 Россия, Мичуринск, ул. Интернациональная, 101, element68@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0883-2867

Анна Владимировна Шлявас, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, ann2668@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-8009-6780

Андрей Викторович Кружков, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Мичуринский государственный аграрный университет, 393760 Россия, Мичуринск, ул. Интернациональная, 101, crujckov@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0005-7777-3305

Наталия Леонидовна Чурикова, кандидат сельскохозяйственных наук, младший научный сотрудник, Мичуринский государственный аграрный университет, 393760 Россия, Мичуринск, ул. Интернациональная, 101, ch.natali19@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-0264-2682

Иван Николаевич Шамшин, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией, Мичуринский государственный аграрный университет, 393760 Россия, Мичуринск, ул. Интернациональная, 101, ivan_shamshin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4464-1876

Information about the authors

Maxim L. Dubrovsky, Cand. Sci. (Agriculture), Head of a Laboratory, Michurinsk State Agrarian University, 101 Internatsionalnaya St., Michurinsk 393760, Russia, element68@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0883-2867

Anna V. Shlyavas, Associate Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, ann2668@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-8009-6780

Andrey V. Kruzhkov, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, Michurinsk State Agrarian University, 101 Internatsionalnaya St., Michurinsk 393760, Russia, crujckov@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0005-7777-3305

Nataliya L. Churikova, Cand. Sci. (Agriculture), Associate Researcher, Michurinsk State Agrarian University, 101 Internatsionalnaya St., Michurinsk 393760, Russia, ch.natali19@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-0264-2682

Ivan N. Shamshin, Cand. Sci. (Biology), Head of a Laboratory, Michurinsk State Agrarian University, 101 Internatsionalnaya St., Michurinsk 393760, Russia, ivan_shamshin@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4464-1876

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 01.10.2025; одобрена после рецензирования 24.11.2025; принята к публикации 16.01.2026.
The article was submitted on 01.10.2025; approved after reviewing on 24.11.2025; accepted for publication on 16.01.2026.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 581.19:634.11
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o8

CC BY

Биохимическая характеристика качества плодов субтропических плодовых культур методом капиллярного электрофореза

Н. Б. Платонова, В. А. Кунина

Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук», Сочи, Россия

Автор, ответственный за переписку: Наталия Борисовна Платонова, natali1875@bk.ru

Актуальность. Оценка качества плодов на основе анализа биохимических маркеров методом капиллярного электрофореза представляет собой перспективное направление аналитических исследований. Данный метод обеспечивает высокую разрешающую способность при анализе многокомпонентных смесей (органических кислот, сахаров) с минимальными затратами реагентов. Его применение необходимо для создания конкурентоспособных сортов субтропических культур, адаптированных к российским эколого-климатическим условиям и способных заместить импортную продукцию.
Материалы и методы. Исследования проводили на 5 сортах персика, 3 сортах нектарина, 5 сортах фейхоа и 5 сортах актинидии. Плоды отобраны в стадии потребительской зрелости. Определение органических кислот и сахаров выполнено методом капиллярного электрофореза на приборе «Капель-105М» (кварцевый капилляр 75 мкм) с детекцией в проточном режиме и обработкой данных с использованием программного обеспечения «Эльфоран».
Результаты и заключение. Выявлены значительные межсортовые различия по содержанию анализируемых показателей. У персика сорта ‘Редхавен’ отмечен сбалансированный кислотный профиль (яблочная кислота – 4,28, лимонная – 4,78 мг/г), а у сорта ‘Осенний Румянец’ – максимальное суммарное содержание сахаров (198,56 мг/г). Максимальное суммарное содержание сахаров также показал нектарин сорта ‘Обильный’ (195,61 мг/г). У фейхоа сорта ‘Суперба’ выявлено максимальное содержание сахарозы (101,70 мг/г), а у сорта ‘ШВ-07’ – моносахаридов. В сортах актинидии ‘Апсны’ и ‘’Победитель’ преобладали фруктоза и глюкоза, а у сорта ‘Отхара’ обнаружено максимальное суммарное содержание сахаров среди сортов актинидии (217,41 мг/г). Капиллярный электрофорез подтвердил эффективность как основной метод для скрининга биохимических маркеров. Полученные данные создают научную основу для селекции сортов с улучшенными вкусовыми свойствами и питательной ценностью в условиях российских субтропиков.

Ключевые слова: «Капель-105М», органические кислоты, сахара, персик, нектарин, актинидия, фейхоа

Благодарности: публикация подготовлена в рамках реализации государственного задания Федерального исследовательского центра «Субтропический научный центр Российской академии наук» № FGRW-2025-0005 «Фундаментальные закономерности биохимических процессов при трансформации сырья субтропического растениеводства», регистрационный номер 125071808812-9.

Для цитирования: Платонова Н.Б., Кунина В.А. Биохимическая характеристика качества плодов субтропических плодовых культур методом капиллярного электрофореза. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(1):21-29. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o8

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

© Платонова Н.Б., Кунина В.А., 2026

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o8

Biochemical quality profiling of subtropical fruit crops by capillary electrophoresis

Natalia B. Platonova, Viktoria A. Kunina

Subtropical Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Sochi, Russia

Corresponding author: Natalia B. Platonova, natali1875@bk.ru

Background. Fruit quality assessment based on the analysis of biochemical markers using capillary electrophoresis is a promising field of analytical research. This method provides high resolution when analyzing multicomponent mixtures (organic acids, sugars, etc.) with minimal reagent consumption. Its application is essential for the development of competitive subtropical fruit crop cultivars adapted to Russian environments and capable of replacing imported produce.
Materials and methods. The study was conducted on 5 cultivars of peach, 3 of nectarine, 5 of feijoa, and 5 of *Actinidia*. Fruits were sampled in the commercial maturity stage. Quantification of organic acids and sugars was performed by capillary electrophoresis using a Kapel-105M system (75 μm quartz capillary) with flow-through detection and data processing using the Elforan software.
Results and conclusion. Significant intervarietal differences were revealed the content of the analyzed compounds. The peach cv. 'Redhaven' demonstrated a balanced acid profile (4.28 mg/g of malic acid, and 4.78 of citric acid), while cv. 'Osenniy Rumyanets' had the highest total sugar content (198.56 mg/g). The nectarine cv. 'Obilny' also showed the maximum total sugar content (195.61 mg/g). The feijoa cv. 'Superba' had the highest sucrose content (101.70 mg/g), and cv. 'SHV-07' the maximum of monosaccharides. Fructose and glucose predominated in cvs. 'Apsny' and 'Pobeditel' of *Actinidia*, while cv. 'Otkhara' contained the maximum of total sugars among *Actinidia* cultivars (217.41 mg/g). Capillary electrophoresis proved effective as a primary method for screening biochemical markers. The data obtained provided a scientific basis for breeding fruit cultivars with improved flavor and nutritional value in Russia's subtropical climate.

Keywords: Kapel-105M, organic acids, sugars, peach, nectarine, *Actinidia*, feijoa

Acknowledgments: the publication was prepared within the framework of the state task assigned to the Subtropical Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, No. FGRW-2025-0005 "Fundamental patterns of biochemical processes in the transformation of raw materials of subtropical plant production", registration number 125071808812-9.

For citation: Platonova N.B., Kunina V.A. Biochemical quality profiling of subtropical fruit crops by capillary electrophoresis. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(1):21-29. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o8

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Основная цель возделывания отечественных субтропических плодовых культур – это импортозамещение и обеспечение продовольственной безопасности, состоящей в создании условий для производства экологически чистой продукции. Плоды данных культур содержат большое количество полезных веществ, которые необходимы для нормального функционирования и оздоровления организма человека – пищевых волокон (пектины, гемицеллюлоза), органических кислот (лимонная, яблочная, винная), моно- и дисахаридов (сахароза, глюкоза, фруктоза), витаминов (аскорбиновая кислота, каротиноиды, токоферолы, фолаты), макро- и микроэлементов (калий, магний, железо, цинк, селен) и биологически активных соединений (флавоноиды, антоцианы, танины, терпеноиды) (Richter, Shoferistov, 2009; Pokhrel et al., 2019). Биохимический профиль субтропических плодов обусловлен спецификой агроэкологических условий зон их возделывания, характеризующихся высокой инсоляцией и суммой активных температур. Систематическое употребление в пищу такой продукции способствует снижению риска развития ряда заболеваний, включая сердечно-сосудистые патологии, благодаря высокой антиоксидантной активности и иммуномодулирующим свойствам содержащихся в плодах биоактивных веществ (Eremin et al., 2002; Boeing et al., 2012; Liu, 2013; Phan et al., 2019). Таким образом, культивирование субтропических культур направлено на участие в государственных программах здорового питания и расширение ассортимента потребляемых населением продуктов. Поэтому развитие и изменение современного агропромышленного сектора ставит перед исследователями задачу создания сортов с высокими показателями качества, определяющими их конкурентоспособность.

В настоящий момент российский рынок сельскохозяйственной продукции характеризуется преобладанием импортных тропических и субтропических плодовых культур, качественные параметры которых зачастую не соответствуют установленным стандартам. Решение этой проблемы возможно за счет увеличения объема производства данных культур на территории Российской Федерации, в частности во влажной субтропической зоне Черноморского побережья, а также в Республике Абхазии. Успешная работа в этом направлении проводится Федеральным исследовательским центром «Субтропический научный центр Российской академии наук» (ФИЦ СНЦ РАН), в генетической коллекции которого поддерживается более 500 сортообразцов субтропических культур (Omarov et al., 2020; Ryndin et al., 2021a, b).

Научными сотрудниками центра непрерывно ведутся комплексные исследования селекционного, агрономического и физиолого-биохимического направлений (Ayba, 2001; Besedina, Tutberidze, 2011; Abilfazova, 2021; Abilfazova et al., 2023; Batashova et al., 2024). Для оптимизации селекционного процесса возникла необходимость создания базы данных биохимических маркеров, содержащихся в спелых плодах перспективных сортов плодовых культур, адаптированных к эколого-климатическим условиям российских влажных субтропиков России и Республики Абхазии.

Для определения биохимических характеристик качества плодов одним из наиболее совершенных аналитических методов детектирования, отличающимся не только скоростью выполнения, но и высокой точностью полученных результатов, является метод капиллярного электрофореза (Komarova, Kamentsev, 2006; Zipaev et al., 2017, 2020; Batashova et al., 2024). Данный метод был выбран для проведения исследований в силу его высокой разрешающей способности при разделении многокомпонентных смесей. Это позволяет определять даже близкие по свойствам вещества в условиях буферного электролита, заполняющего кварцевый капилляр, под воздействием приложенного электрического поля с последующей детекцией аналитов в режиме проточного анализа. Приложение высокого напряжения (до 30 кВ) к электродам капилляра индуцирует электроосмотический поток, в результате которого компоненты пробы мигрируют с разной скоростью, определяемой величиной заряда. Разделение компонентов пробы осуществляется в форме дискретных зон, которые регистрируются детектором последовательно в зависимости от времени их миграции, обусловленной различиями в электрофоретической подвижности аналитов. Качественная идентификация веществ осуществляется по времени их миграции, тогда как количественная оценка – по высоте и площади пиков, коррелирующих с концентрацией соединений в образце (Komarova, Kamentsev, 2006).

Использование современных методов в оценке биохимических качеств плодов позволяет расширить и обновить комплекс определяемых показателей как в уже имеющимся видовом составе, так и для вновь интродуцированных сортов, пополняющих коллекционный фонд ФИЦ СНЦ РАН и Государственного научного учреждения «Институт сельского хозяйства Академии наук Абхазии» (ГНУ ИСХ АНА).

Цель данной работы – на примере выбранных сортов четырех видов субтропических культур показать эффективность применения метода капиллярного электрофореза для количественного определения биохимических маркеров качества плодов (органических кислот и сахаров) с последующей идентификацией перспективных сортов, адаптированных к условиям российских субтропиков и способных заместить импортную продукцию.

Материалы и методы

Материалом для проведения биохимической характеристики качества плодов послужили сортообразцы перспективных плодовых культур из генетических коллекций ФИЦ СНЦ РАН (персик, нектарин, фейхоа) и ГНУ ИСХ АНА (актинидия) (таблица).

Плоды персика, нектарина и фейхоа были отобраны в 2024 г. с коллекционно-опытных насаждений ФИЦ СНЦ РАН (г. Сочи, Россия), расположенных на склоне северо-западной экспозиции на высоте 115–132 м над уровнем моря (крутизна склона – 10–15°; удаление от моря – 2 км). Почва на этих участках бурая лесная, тяжелосуглинистая. Метеорологические условия 2024 г. характеризовались аномально теплой погодой с дефицитом осадков. В зимне-весенний период (январь – апрель) температура устойчиво превышала среднемноголетние значения на +1,3…+4,5°С. Летом также сохранялся положительный температурный фон (отклонение от нормы – до +2,3°С), при этом июнь и июль были засушливыми (количество осадков в июне составило лишь 2% от нормы). Плоды актинидии, выращенные на коллекционных участках ГНУ ИСХ АНА (г. Сухум, Республика Абхазия), также были отобраны в 2024 г. Посадки расположены на бурых лесных слабокислых почвах предгорной зоны. По данным метеонаблюдений, 2024 г. характеризовался устойчи-

Таблица. Список опытных образцов субтропических плодовых культур из коллекций Субтропического научного центра РАН и Института сельского хозяйства Академии наук Абхазии

Table. List of experimental samples of subtropical fruit crops from the collections of the Subtropical Scientific Center of the Russian Academy of Sciences and the Institute of Agriculture of the Academy of Sciences of Abkhazia

Сорт / Cultivar	Происхождение / Origin
Персик	
‘Редхаве’ (контроль)	США
‘Пятница 13’	Россия
‘Память Симиренко’	Россия
‘Золотой Юбилей’	США
‘Осенний Румянец’	Россия
Нектарин	
‘Silver Roma’ (контроль)	Италия
‘Обильный’	Узбекистан
‘Орион’	Италия
Фейхоа	
‘Суперба’ (контроль)	США
‘Дачная’	Россия
‘Сентябрьская’	Россия
‘Д-1’	Россия
‘ШВ-07’	Россия
Актинидия	
‘Победитель’ (контроль)	Абхазия
‘Отхара’	Абхазия
‘Апсны’	Абхазия
‘Гулрипшский’	Абхазия
‘Слава’	Абхазия

вым положительным термическим фоном (аномалия +1.5...+3.5°C) и неравномерным распределением осадков. Отмечены весенний дефицит осадков (< 40% от нормы) и летняя засуха (июнь – 25% от нормы) на фоне повышенных температур (аномалия до +2.5°C). Для опыта плоды отбирались в период массового сбора урожая, однородные, свежие, здоровые, в стадии товарной зрелости, без дефектов, с характерными сортовыми признаками.

Аналитические исследования проведены с помощью системы капиллярного электрофореза на приборе «Капель-105М» (ООО «Люмэкс-Маркетинг», Россия) со следующими характеристиками: кварцевый капилляр (внутренний диаметр – 75 мкм), эффективная длина – 0,6 м, жидкостное термостатирование. Анализ заключался в экстрагировании соединений из образцов сока, последующем осветлении полученных экстрактов центрифугированием и их определении с применением фонового электролита в соответствии с рекомендациями компании-разработчика (ООО «Люмэкс-Маркетинг»). Обработка результатов анализов выполнена с помощью программного обеспечения «Эльфоран» по совпадению времени миграции компонентов в пробе и контрольной смеси при ширине окна идентификации 5% (Komarova, Kamentsev, 2006).

Биохимические исследования выполнены с использованием оборудования лаборатории биосинтетических процессов преобразования растительного сырья ФИЦ СНЦ РАН.

Результаты и обсуждение

Критериями оценки качества плодов выступает содержание в них органических кислот и сахаров, которые служат ключевыми маркерами при идентификации ценных генотипов для селекции. В связи с этим в рамках научных исследований нами была проведена серия анализов для отбора образцов с наиболее сбалансированным биохимическим профилем. Проведенный анализ литературных данных показал ограниченную возможность прямого сопоставления полученных результатов с исследованиями других авторов. Это связано с применением в существующих работах либо иных методических подходов, преимущественно традиционных, либо метода капиллярного электрофореза, но на других плодовых культурах, таких как виноград, яблоня, груша и другие.

Выбранный нами подход позволит получить сопоставимые данные для последующей селекционной работы с исследуемыми культурами.

Так, в образцах плодов персика обнаружены следующие органические кислоты: винная, яблочная, молочная, янтарная, лимонная и щавелевая. Установлено, что больше всего в плодах всех изученных сортов персика содержится яблочной и лимонной кислот (рис. 1). Яблочная кислота обеспечивает характерную кислотность, тогда как лимонная вносит вклад в формирование свежего, сбалансированного послевкусия. Концентрации данных кислот варьируют в зависимости от сортовых особенностей, степени зрелости плодов и агроклиматических условий выращивания.

углеводов (фруктоза – 26,88 мг/г, глюкоза – 22,78 мг/г, сахароза – 148,90 мг/г), что создает сложный и интенсивный сладкий профиль. Сорт 'Память Симиренко' показал самое низкое содержание сахарозы (59,49 мг/г) среди всех изученных сортов, что повлияло на характер слабого сахаронакопления. Сорта 'Редхавен', 'Пятница 13', 'Золотой Юбилей' продемонстрировали сходный биохимический профиль сахаров: умеренное общее содержание и высокая доля сахарозы, что обеспечивает гармоничный вкус.

Тот же комплекс биохимических анализов был проведен для плодов нектарина (рис. 2).

Во всех исследованных сортах содержание лимонной кислоты существенно превосходит содержание яблоч-

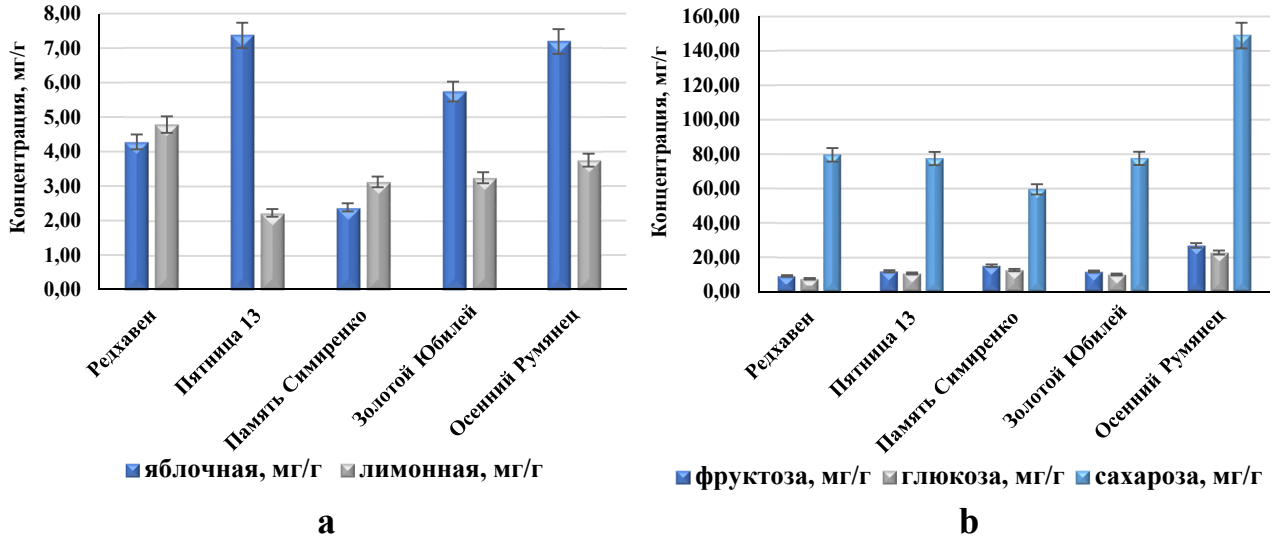


Рис. 1. Содержание основных органических кислот (a), моно- и дисахаров (b) в плодах персика по сортам

Fig. 1. The content of major organic acids (a) and mono- and disaccharides (b) in peach fruits differing by cultivar

Максимальные значения содержания яблочной кислоты зафиксированы у сортов 'Пятница 13' (7,37 мг/г) и 'Осенний Румянец' (7,19 мг/г), тогда как минимальный уровень отмечен у сорта 'Память Симиренко' (2,38 мг/г). Примечательно, что сорт 'Пятница 13', отличающийся высоким содержанием яблочной кислоты, одновременно характеризуется самым низким содержанием лимонной кислоты (2,22 мг/г), что свидетельствует о выраженном дисбалансе органических кислот в его биохимическом профиле. В контрольном сорте 'Редхавен' установлены близкие количественные показатели яблочной (4,28 мг/г) и лимонной (4,78 мг/г) кислот, формирующие гармоничный вкусовой комплекс.

Данные, представленные на графике, демонстрируют выраженные сортовые различия по содержанию растворимых сахаров. Их содержание и состав являются одними из ключевых биохимических параметров, определяющих органолептические свойства (вкус, аромат, текстуру) плодов. Наибольшей сладостью характеризуются плоды с преобладанием фруктозы, что связано с высоким коэффициентом сладости данного моносахарида. Плоды с преобладанием сахарозы характеризуются классическим сбалансированным сладким вкусом, с преобладанием глюкозы – менее выраженной сладостью, но зато служат быстрым источником энергии для организма.

На фоне образцов, характеризующихся средними показателями, выделяется сорт 'Осенний Румянец', демонстрирующий самое высокое содержание всех фракций ной (см. рис. 2, а). Сорт 'Орион' выделяется максимальным содержанием обеих кислот (8,65 мг/г и 5,07 мг/г соответственно). Сорт 'Обильный' характеризуется минимальным содержанием яблочной кислоты (4,11 мг/г), но высоким – лимонной (8,41 мг/г). Сорт 'Silver Roma' (контроль) демонстрирует наименьшие показатели по содержанию лимонной кислоты (8,00 мг/г). Таким образом, статистически значимых межсортовых различий в содержании органических кислот выявлено не было.

Проведенный анализ выявил существенные сортовые различия в составе и содержании сахаров в плодах нектарина. Сорт 'Обильный' обладает уникально высоким содержанием всех исследованных сахаров (фруктоза – 34,62 мг/г, глюкоза – 29,49 мг/г, сахароза – 131,50 мг/г), формируя интенсивный, насыщенный сладкий вкус с богатым послевкусием. Контрольный сорт 'Silver Roma' (фруктоза – 19,55 мг/г, глюкоза – 15,88 мг/г, сахароза – 75,71 мг/г) и сорт 'Орион' (фруктоза – 21,14 мг/г, глюкоза – 18,56 мг/г, сахароза – 81,53 мг/г) демонстрируют сходный сахарный профиль, обеспечивающий характерный сбалансированный, классический сладкий вкус. Содержание сахарозы является максимальным во всех изученных сортах и составляет около 67–68% от общего содержания растворимых сахаров.

В рамках исследования нами был проведен целевой отбор образцов из коллекции фейхоа Субтропического научного центра Российской академии наук, осуществленный на основе комплексной оценки хозяйственно ценных

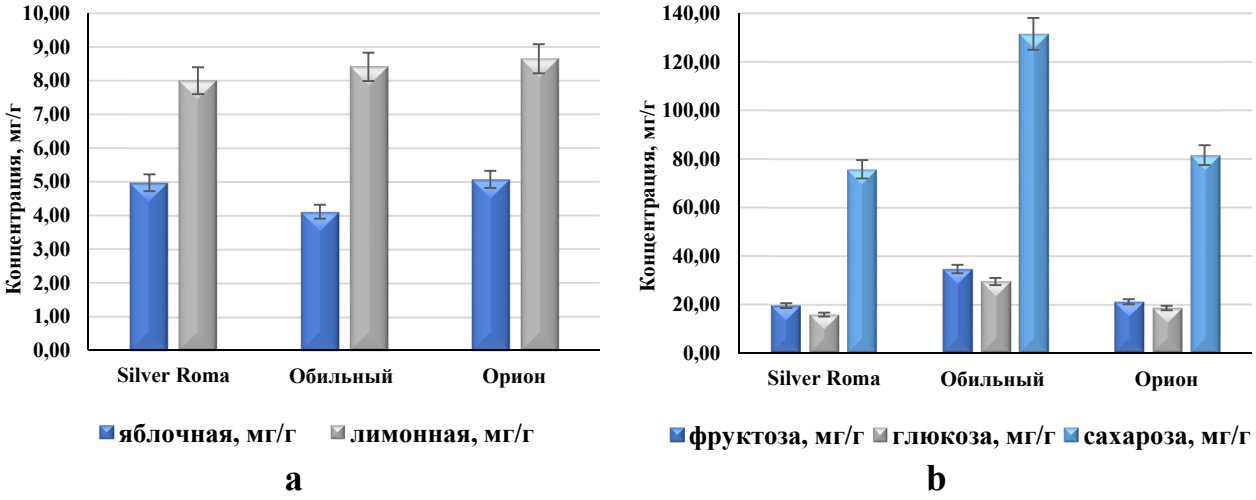


Рис. 2. **Содержание основных органических кислот (a), моно- и дисахаров (b) в плодах нектарина по сортам**
Fig. 2. **The content of major organic acids (a) and mono- and disaccharides (b) in nectarine fruits differing by cultivar**

признаков, включающих продуктивность и устойчивость к биотическим и абиотическим стрессам (Omarov et al., 2020). Для выбранных сортов проведен аналогичный комплекс биохимических анализов.

Данные (рис. 3, a) демонстрируют значительные межсортовые различия в содержании как яблочной, так и лимонной кислоты, а также в общей кислотности плодов. Так, высокое содержание органических кислот отмечено у сорта ‘Дачная’ (яблочная – 3,22 мг/г, лимонная – 21,40 мг/г). Сорт ‘Сентябрьская’, напротив, характеризуется минимальными значениями (0,85 мг/г и 7,44 мг/г соответственно). У сорта ‘ШВ-07’ зафиксировано самое высокое содержание лимонной кислоты (22,71 мг/г). Сорта ‘ШВ-07’ и ‘Дачная’ характеризуются наиболее высокой общей кислотностью, преимущественно за счет лимонной кислоты, в то время как сорт ‘Сентябрьская’ обладает самым мягким кислотным профилем в сравнении с контрольным сортом ‘Суперба’ (яблочная – 1,20 мг/г, лимонная – 11,38 мг/г).

Данные, представленные на графике (рис. 3, b), демонстрируют значительные различия в содержании сахаров между изученными образцами фейхоа, подчеркивая важность их генотипа. Так, сорт ‘Суперба’ лидирует не только по содержанию сахарозы (101,70 мг/г), но и в целом по сумме сахаров (129,49 мг/г). Наименьшее содержание сахаров отмечено у сорта ‘Д-1’: сахароза – 60,06 мг/г, сумма сахаров – 93,61 мг/г. Анализ данных показывает, что общее содержание сахаров в плодах сортов ‘Сентябрьская’ (116,91 мг/г), ‘ШВ-07’ (109,61 мг/г) и ‘Дачная’ (118,41 мг/г) не имеет существенных межсортовых различий. Особый интерес представляет сорт ‘ШВ-07’, демонстрируя высокое содержание фруктозы и глюкозы при относительно низкой доле сахарозы, что является нетипичным для фейхоа. Данное сочетание сахаров может придавать его плодам несколько иной вкусовой оттенок по сравнению с сортами, имеющими высокое содержание сахарозы (‘Суперба’, ‘Дачная’, ‘Сентябрьская’).

В рамках комплексного биохимического анализа плодов пяти сортов актинидии также выполнено сравнительное исследование содержания органических кислот и сахаров (рис. 4).

Результаты исследования показали зависимость кислотного состава плодов актинидии от генотипических

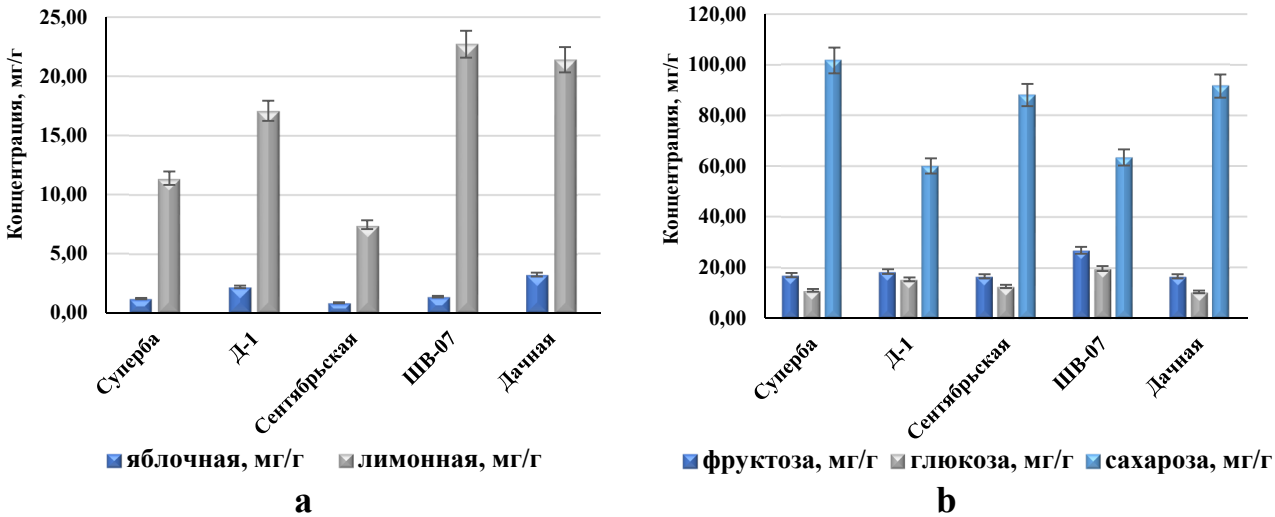


Рис. 3. **Содержание основных органических кислот (a), моно- и дисахаров (b) в плодах фейхоа по сортам**
Fig. 3. **The content of major organic acids (a) and mono- and disaccharides (b) in feijoa fruits differing by cultivar**

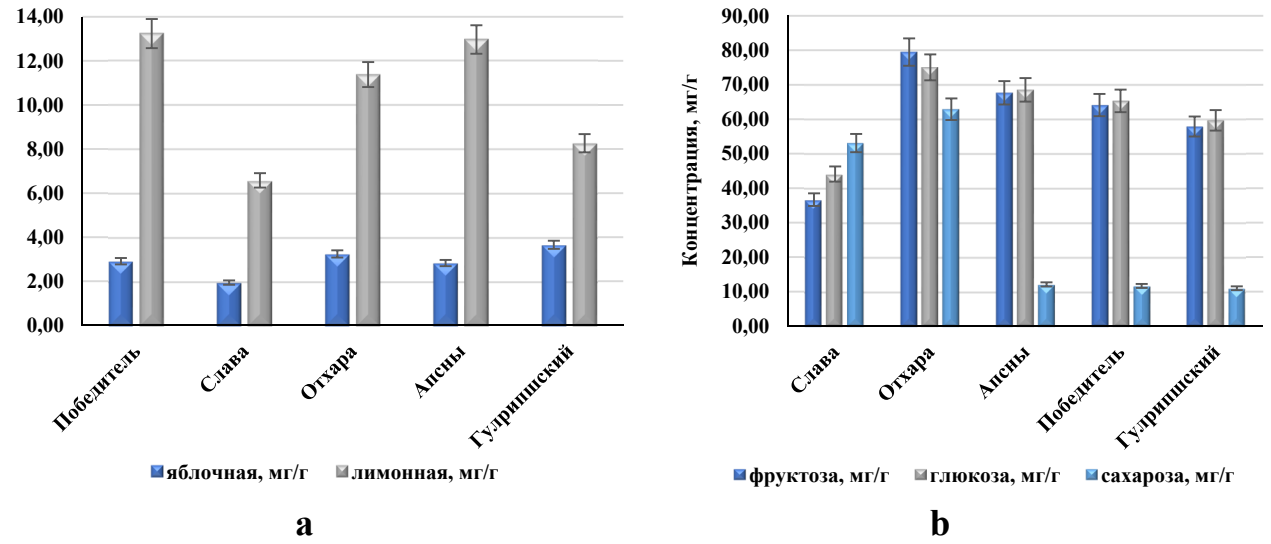


Рис. 4. Содержание основных органических кислот (a), моно- и дисахаров (b) в плодах актинидии по сортам
Fig. 4. The content of major organic acids (a) and mono- and disaccharides (b) in *Actinidia* fruits differing by cultivar

особенностей сорта. Сорта 'Победитель' (контроль) и 'Апсны' характеризуются максимальным содержанием лимонной кислоты (13,24 мг/г и 12,97 мг/г соответственно), что предполагает выраженный кислый вкус. Наибольшее содержание яблочной кислоты (3,65 мг/г) выявлено у сорта 'Гулрипшский'. В целом данный сорт отличается сбалансированным соотношением кислот. Сорт 'Слава' обладает минимальным содержанием обеих кислот (яблочная – 11,94 мг/г, лимонная – 6,58 мг/г), что указывает на потенциально более мягкий вкус. Сорт 'Отхара' демонстрирует высокое содержание лимонной кислоты (11,38 мг/г) при умеренном уровне яблочной.

Также в разных сортах актинидии нами были выявлены значимые различия в содержании фруктозы, глюкозы и сахарозы. Сорта 'Апсны', 'Победитель' (контроль), 'Гулрипшский' характеризуются высоким содержанием фруктозы (67,68 мг/г, 64,11 мг/г и 57,89 мг/г соответственно) и глюкозы (68,52 мг/г, 65,31 мг/г и 59,68 мг/г соответственно) и очень низким содержанием сахарозы (12,06 мг/г, 11,66 мг/г и 10,97 мг/г соответственно), что обеспечивает ярко выраженное десертное вкусовое ощущение. Сорта 'Слава' и 'Отхара' отличаются значительным содержанием сахарозы (53,09 мг/г и 62,90 мг/г) одновременно с высоким уровнем моносахаридов. Сорт 'Отхара' обладает наибольшим суммарным содержанием сахаров (217,41 мг/г), значительно превосходя другие сорта, характеризуется как более сладкий.

Заключение

Проведенное исследование биохимических параметров качества плодов субтропических плодовых культур методом капиллярного электрофореза подтвердило его высокую эффективность при количественном определении органических кислот и сахаров в плодах для скрининга биохимических маркеров качества в селекции.

Установлены значимые межсортовые различия в содержании и соотношении сахарокислотных компонентов у всех изученных культур (персик, нектарин, фейхоа, актинидия), что подчеркивает определяющую роль генотипа в формировании биохимического профиля каждого изученного сорта.

Так, выявлен сорт персика с гармоничным вкусовым комплексом, напрямую зависящим от кислотного профиля сорта (контрольный сорт 'Редхавен'), и сорт с выраженным вкусовым дисбалансом ('Пятница 13' – высокая яблочная / низкая лимонная кислоты). Сорт 'Осенний Румянец' выделяется высоким суммарным накоплением сахаров, а сорт 'Память Симиренко' – минимальным.

При изучении плодов нектарина установлено, что сорт 'Обильный' обладает высоким суммарным содержанием сахаров (195,61 мг/г), значительно превосходя сорта 'Silver Roma' (контроль) и 'Орион'. Во всех сортах нектаринов содержание лимонной кислоты преобладает над содержанием яблочной.

У сортов фейхоа обнаружены значительные различия по содержанию кислот (максимум у 'ШВ-07' и 'Дачная', минимум у 'Сентябрьской') и сахаров. Максимальное содержание суммы сахаров выявлено у контрольного сорта 'Суперба'. Сорт 'ШВ-07' продемонстрировал нетипично высокое для фейхоа содержание моносахаридов (глюкозы и фруктозы) одновременно с относительно низким содержанием сахарозы.

У сортов актинидии 'Апсны', 'Победитель' (контроль), 'Гулрипшский' обнаружено высокое содержание моносахаридов (фруктозы и глюкозы) и очень низкое содержание сахарозы. Напротив, сорта 'Слава' и 'Отхара' характеризуются значительной долей сахарозы на фоне высокого уровня моносахаридов. Сорт 'Отхара' обладает максимальным суммарным содержанием сахаров (217,41 мг/г) среди изученных сортов актинидии.

Таким образом, результаты, полученные нами с помощью метода капиллярного электрофореза, могут служить основой создания базы данных биохимических маркеров (кислот, сахаров и др.), содержащихся в плодах потребительской степени зрелости перспективных сортов субтропических плодовых культур. При этом их прикладное значение заключается в оптимизации селекционного процесса (создание сортов, обладающих улучшенными вкусовыми и ценными пищевыми качествами), сертификации продукции, адаптированной к эколого-климатическим условиям влажных субтропиков России и Республики Абхазии, а также повышении конкурентоспособности отечественного плодоводства.

References / Литература

Abilfazova Yu.S. Biochemical composition of peach fruits in the subtropical regions of Russia. *Horticulture and Viticulture*. 2021;(2):19-23. [in Russian] (Абильфазова Ю.С. Биохимический состав плодов персика в субтропиках России. *Садоводство и виноградарство*. 2021;(2):19-23). DOI: 10.31676/0235-2591-2021-2-19-23

Abilfazova Yu.S., Besedina T.D., Tutberidze Ts.V. Biochemical composition of fruit in *Actinidia deliciosa* (A. Chev.) C.F. Liang & A.R. Ferguson in the humid subtropics of Russia. *Horticulture and Viticulture*. 2023;(5):42-48. [in Russian] (Абильфазова Ю.С., Беседина Т.Д., Тутберидзе Ц.В. Биохимический состав плодов *Actinidia deliciosa* (A. Chev.) C.F. Liang & A.R. Ferguson во влажных субтропиках России. *Садоводство и виноградарство*. 2023;(5):42-48). DOI: 10.31676/0235-2591-2023-5-42-48

Ayba L.Ya. Kiwi cultivation in Abkhazia (Kultura kivi v Abkhazii). Sukhum: Alashara; 2001. [in Russian] (Айба Л.Я. Культура киви в Абхазии. Сухум: Алашара; 2001).

Batashova S.S., Zolotukhina A.A., Guryleva A.V., Platonova N.B., Kunina V.A. Method for automated assessment of the effectiveness of fruit safety enhancement using an acousto-optical imaging spectrometer. *Journal of Optical Technology*. 2024;91(7):452-458. DOI: 10.1364/JOT.91.000452

Besedina T.D., Tutberidze Z.V. Problematic aspects in technology of *Actinidia* sweet (kiwifruit) cultivation in subtropics of Russia. *Subtropical and Ornamental Horticulture*. 2011;(44):143-147. [in Russian] (Беседина Т.Д., Тутберидзе Ц.В. Проблемные аспекты в технологии возделывания актинидии сладкой (киви) в субтропиках России. *Субтропическое и декоративное садоводство*. 2011;(44):143-147).

Boeing H., Bechthold A., Bub A., Ellinger S., Haller D., Kroke A. et al. Critical review: vegetables and fruit in the prevention of chronic diseases. *European Journal of Nutrition*. 2012;51(6):637-663. DOI: 10.1007/s00394-012-0380-y

Eremin G.V., Provorchenko A.V., Gavrish V.F., Podorozhnyi V.N., Eremin V.G. Stone fruit crops. Growing on clonal rootstocks and own roots (Kostochkovye kultury. Vyrashchivaniye na klonovykh podvoyakh i sobstvennykh kornyakh). Rostov-on-Don: Phoenix; 2002. [in Russian] (Еремин Г.В., Проворченко А.В., Гавриш В.Ф., Подорожный В.Н., Еремин В.Г. Косточковые культуры: Выращивание на клоновых подвоях и собственных корнях. Ростов на Дону: Феникс; 2002).

Komarova N.V., Kamentsev Ya.S. Practical guide to the use of the KAPEL capillary electrophoresis systems (Prakticheskoye rukovodstvo po ispolzovaniyu sistem kapillyarnogo elektroforeza “KAPEL”). St. Petersburg: Veda; 2006. [in Russian] (Комарова Н.В., Каменцев Я.С. Практическое руководство по использованию систем капиллярного электрофореза «КАПЕЛЬ». Санкт-Петербург: Веда; 2006).

Liu R.H. Health-promoting components of fruits and vegetables in the diet. *Advances in Nutrition*. 2013;4(3):384-392. DOI: 10.3945/an.112.003517

Omarov M.D., Omarova Z.M., Karpun N.N. Feijoa cultivation in the humid subtropics of Russia: a monograph (Kultura feykhoa vo vlazhnykh subtropikakh Rossii: monografiya). Sochi; 2020. [in Russian] (Омаров М.Д., Омарова З.М., Карпун Н.Н. Культура фейхоа во влажных субтропиках России: монография. Сочи; 2020).

Phan A.D.T., Chaliha M., Sultanbawa Y., Netzel M.E. Nutritional characteristics and antimicrobial activity of Australian grown feijoa (*Acca sellowiana*). *Foods*. 2019;8(9):376. DOI: 10.3390/foods8090376

Pokhrel S., Raut N., Bhattarai D.R. Biochemical analysis of kiwifruit grown in Nepal. *International Journal of Horticulture*. 2019;(9)4:23-30. DOI: 10.5376/ijh.2019.09.0004

Richter A.A., Shoferistov E.P. Pomological and biochemical peculiarities of peach hybrids and varieties for genus *Persica* Mill. (*Prunus persica* Borkh.) with anthocyanidin pigmentation of fruits pulp and leaves. *Plant Varieties Studying and Protection*. 2009;1(9):42-50. [in Russian] (Рихтер А.А., Шоферистов Е.П. Помологические и биохимические особенности сортов и гибридов рода *Persica* Mill. (*Prunus persica* Borkh.) с антоциановой окраской мякоти плодов и листьев. *Сортовивчення та охорона прав на сорти рослин*. 2009;1(9):42-50).

Ryndin A.V. Kulyan R.V., Slepchenko N.A. Subtropical and flower crops breeding at the Subtropical Scientific Centre. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2021a;25(4):420-432. [in Russian] (Рындин А.В., Кулян Р.В., Слепченко Н.А. Селекция субтропических и цветочных культур в ФИЦ «Субтропический научный центр РАН». *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2021a;25(4):420-432). DOI: 10.18699/VJ21.047

Ryndin A.V., Kulyan R.V., Slepchenko N.A., Tutberidze Ts.V., Gorshkov V.M. The results of introduction of subtropical, southern fruit and flower-ornamental crops in FRC SSC of RAS. *Subtropical and Ornamental Horticulture*. 2021b;(77):25-44. [in Russian] (Рындин А.В., Кулян Р.В., Слепченко Н.А., Тутберидзе Ц.В., Горшков В.М. Результаты интродукции субтропических, южных плодовых и цветочно-декоративных культур в ФИЦ СНЦ РАН в 2020 г. *Субтропическое и декоративное садоводство*. 2021b;(77):25-44). DOI: 10.31360/2225-3068-2021-77-25-43

Zipaev D.V., Nikitchenko N.V., Platonov I.A. Determination of organic acids by capillary electrophoresis in the feed beer beverage with triticale. *Beer and Beverages*. 2017;(1):44-47. [in Russian] (Зипаев Д.В., Никитченко Н.В., Платонов И.А. Определение органических кислот методом капиллярного электрофореза в сырье пивного напитка с тритикале. *Пиво и напитки*. 2017;(1):44-47).

Zipaev D.V., Tulina A.A., Kozhukhov A.N. The use of capillary electrophoresis in the evaluation of food and beverages. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2020;82(1):82-87. [in Russian] (Зипаев Д.В., Тулина А.А., Кожухов А.Н. Использование метода капиллярного электрофореза в оценке пищевых продуктов и напитков. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2020;82(1):82-87). DOI: 10.20914/2310-1202-2020-1-82-87

Информация об авторах

Наталия Борисовна Платонова, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук», 354002 Россия, Сочи, ул. Яна Фабрициуса, 2/28, natali1875@bk.ru, https://orcid.org/0000-0003-2392-8947

Виктория Алексеевна Кунина, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук», 354002 Россия, Сочи, ул. Яна Фабрициуса, 2/28, kunina.v@internet.ru, https://orcid.org/0009-0005-2640-4921

Information about the authors

Natalia B. Platonova, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, Subtropical Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2/28 Yana Fabritsiusa St., Sochi 354002, Russia, natali1875@bk.ru, https://orcid.org/0000-0003-2392-8947

Viktoria A. Kunina, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Subtropical Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2/28 Yana Fabritsiusa St., Sochi 354002, Russia, kunina.v@internet.ru, https://orcid.org/0009-0005-2640-4921

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 05.08.2025; одобрена после рецензирования 11.11.2025; принята к публикации 14.01.2026.
The article was submitted on 05.08.2025; approved after reviewing on 11.11.2025; accepted for publication on 14.01.2026.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 631.52:635.112
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o11

CC BY

Скрининг скороспелых образцов амаранта коллекции ВИР по аминокислотному составу семян

Д. В. Соколова, А. Е. Соловьева, Т. В. Шеленга

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

Автор, ответственный за переписку: Диана Викторовна Соколова, dianasokol@bk.ru

Актуальность. Амарант – ценная и перспективная культура многоцелевого использования, рекордсмен по содержанию полноценного белка в семенах и листьях. Обладает большим генетическим разнообразием, пластичностью и высокой адаптивной способностью к неблагоприятным условиям среды.
Материалы и методы. Материалом для исследования послужили семена 105 образцов амаранта из коллекции Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР), выделенных в 2024 г. как скороспелые в нетипичных для культуры условиях Северо-Западного региона РФ. Содержание белка определяли по методу Кьельдаля, аминокислотный состав – методом ионообменной хроматографии.
Результаты. В результате исследования определено содержание белка в семенах амаранта, идентифицирован аминокислотный профиль, включающий 17 аминокислот. Установлено, что в целом для зерновых форм амаранта характерна низкая вариабельность содержания белка. Выявлено достоверное превышение его уровня (+9,7%) в группе ультраскороспелых образцов. Показаны различия между группами спелости по содержанию серина, играющего значительную роль в формировании реакции растений на абиотические стрессы. Отмечены межвидовые различия аминокислотного состава семян у видов *Amaranthus cruentus* L. и *A. hypochondriacus* L. В результате скрининга отмечены генотипы, обладающие высоким содержанием белка, отдельных аминокислот, а также обладающие комплексом хозяйственно ценных признаков. Данные образцы рекомендуются для включения в селекционные программы по созданию скороспелых холодостойких сортов зернового амаранта с высоким выходом белка после получения устойчивых показателей хозяйственно ценных признаков в ходе последующего изучения выделившихся в текущем исследовании образцов.

Ключевые слова: *Amaranthus* L., урожайность семян, белок, генотип, коллекция ВИР

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-26-00218).

Для цитирования: Соколова Д.В., Соловьева А.Е., Шеленга Т.В. Скрининг скороспелых образцов амаранта коллекции ВИР по аминокислотному составу семян. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(1):30-39. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o11

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

© Соколова Д.В., Соловьева А.Е., Шеленга Т.В., 2026

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o11

Screening of early-maturing amaranth accessions from the VIR collection for the amino acid composition of seeds

Diana V. Sokolova, Alla E. Solovyeva, Tatiana V. Shelenga

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

Corresponding author: Diana V. Sokolova, dianasokol@bk.ru

Background. In recent years, with the growing awareness of the need for health protection among consumers and producers, nutritional trends have also changed, and the interest in functional foods has increased. Amaranth is a valuable and promising multipurpose crop, a record holder in the content of complete protein in seeds and leaves, possessing rich genetic diversity, plasticity, and high adaptability to unfavorable environmental conditions.
Materials and methods. The objective was to assess amino acid profiles in 105 amaranth accessions from the collection of the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), previously identified as early-maturing under the conditions of Northwest Russia, atypical for this crop. Seed protein content was measured by the Kjeldahl method, and amino acid composition was analyzed using ion exchange chromatography.
Results. The protein content of amaranth seeds was quantified, and the amino acid profile that included 17 amino acids was determined. Grain forms of amaranth manifested low variability in protein content. The group of ultra-early accessions showed a significant increase in protein levels (+9.8%). Differences were observed among the maturity groups in the content of serine, which plays a significant role in the formation of plant response to abiotic stresses. Interspecies differences in amino acid composition were recorded for *Amaranthus cruentus* L. and *A. hypochondriacus* L. The screening resulted in identifying genotypes with high protein content, high amounts of individual amino acids, and a set of valuable agronomic traits. Such accessions may be recommended for breeding programs aimed at the development of early cold-resistant cultivars of grain amaranth with high protein content after obtaining stable parameters of agronomic traits during subsequent analyses of the accessions identified in the current study.

Keywords: *Amaranthus* L., seed yield, protein, genotype, VIR collection

Acknowledgments: this research was supported by the Russian Science Foundation under Project No. 24-26-00218.

For citation: Sokolova D.V., Solovyeva A.E., Shelenga T.V. Screening of early-maturing amaranth accessions from the VIR collection for the amino acid composition of seeds. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(1):30-39. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o11

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

В последние годы предъявляются все большие требования к качеству пищи. С ростом интереса потребителей и производителей к защите здоровья изменились и тенденции в питании, возрос интерес к функциональным продуктам. Изменения климатических условий также заставляют обратить внимание на поиск новых источников биологически ценных компонентов, особенно богатых высококачественным белком и микроэлементами. Амарант относится к числу таких источников (Gins et al., 2018). *Amaranthus* L. – ценная и перспективная сельскохозяйственная культура многоцелевого назначения. Имеет распространение главным образом в умеренных, субтропических и тропических зонах. Обладает большим генетическим разнообразием, фенотипической пластичностью, высокой адаптивной способностью к неблагоприятным условиям среды (Rastogi, Shukla, 2013). Наряду с гречихой и киноа, амарант является представителем группы «псевдозлаковых» растений. К зерновым формам амаранта относятся виды *A. cruentus* L. и *A. hypochondriacus* L., берущие свое начало из Центральной и Северной Америки, и *A. caudatus* L. южноамериканского происхождения (Covas, 1994).

Белки – важные макронутриенты в питании человека. Известно, что амарант является рекордсменом по содержанию полноценного белка в семенах и листьях с оптимальным соотношением аминокислот, определяющих его высокую пищевую ценность (Gins et al., 2019; Sokolova et al., 2021). В отличие от злаков, белки амаранта в основном образованы из альбуминов и глобулинов, практически не содержат проламиновых белков, участвующих в формировании непереносимости глютена у некоторых людей (Alvarez-Jubete et al., 2010). Содержание высокоусвояемого безглютенового белка, превышающее этот показатель в семенах традиционных зерновых культур (ржи, кукурузы и риса), подтверждает перспективность использования амаранта (Grobelnik-Mlakar et al., 2009).

Из 20 аминокислот организм человека способен самостоятельно синтезировать двенадцать. Незаменимыми для взрослого человека являются 8 аминокислот: валин, изолейцин, лейцин, лизин, метионин, треонин, триптофан и фенилаланин. Эти аминокислоты должны поступать в организм человека из пищи. Вопрос о принадлежности аминокислот к той или иной группе активно изучается медицинским сообществом: отдельные аминокислоты синтезируются в недостаточном количестве и признаются частично незаменимыми. К ним относятся аргинин, гистидин и тирозин.

Большинству семян злаковых культур не хватает нескольких незаменимых аминокислот, что делает их аминокислотный профиль несбалансированным. Поскольку белок амаранта уникален по своему составу, имеются сведения о его использовании для улучшения других культур. К примеру, гены, кодирующие белки амаранта, использовались для создания трансгенных растений мягкой пшеницы, картофеля и кукурузы. В статье A. Raina и A. Datta (Raina, Datta, 1992) сообщалось об успешном клонировании гена *AmA1*, кодирующего белок семян амаранта со сбалансированным аминокислотным составом. Позже данный ген успешно внедрили в картофель, что привело к увеличению общего содержания белка в клубнях на 60% (Chakraborty et al., 2000). Аналогичным образом было увеличено содержание незаменимых аминокислот (лизина, треонина и тирозина) у мягкой пшеницы (Tamás et al., 2009). Ученые из Мексиканского Центра перспективных исследований (Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN) использовали ДНК 11S-глобулина *A. hypochondriacus* для трансформации генотипа тропической кукурузы. В результате в семенах кукурузы на 32% увеличилось содержание общего белка (Rascón-Cruz et al., 2003).

Вышесказанное подтверждает высокую ценность белка семян амаранта и актуальность исследований в данном направлении. *Целью работы* являлся скрининг аминокислотного профиля у скороспелых образцов амаранта из коллекции Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР) для оценки потенциала культуры при выращивании в нетипичных для нее условиях Северо-Западного региона РФ как источника хозяйственно ценных признаков для производства функциональных продуктов питания и селекции, направленной на получение урожайных стрессоустойчивых сортов с высоким качеством семян.

Материалы и методы

Для анализа аминокислотного состава использовались семена 105 образцов амаранта различного происхождения из коллекции ВИР, выращенные в условиях открытого грунта на опытных полях научно-производственной базы «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» (59°7111275′N, 30°43032647′E; Пушкин, Санкт-Петербург, РФ) в 2024 г. Видовой состав: *A. cruentus* (75) и *A. hypochondriacus* (30). Образцы отбирались по результатам скрининга зерновых форм как наиболее скороспелые, способные сформировать зрелые семена за 87–114 дней от посева (Sokolova, 2025). Оба вида имеют центрально- и североамериканское происхождение, культивируются главным образом для получения семян, отличаются высокой урожайностью и устойчивостью к абиотическим факторам.

Для оценки содержания белка и аминокислотного состава семян амаранта из коллекции ВИР выбрали методы, применимые для скрининга большого количества образцов. Содержание белка определяли по методу Кьельдаля на автоматическом анализаторе белка Velp Scientifica UDK 159 (Velp, Италия). Белок рассчитывали по общему содержанию азота с использованием коэффициента 6,25 (Kjeldahl, 1883). Аминокислотный состав определяли с помощью анализатора ARACUS (MembraPure GmbH, Боденхайм, Германия), оснащенного фотометрическим детектором. Аминокислоты идентифицировали при длине волны 570 нм, пролин – 440. Кислотный гидролиз проводили 6Н-раствором (нормальным) соляной кислоты (HCl) при температуре 110°C в течение 24 ч в термошкафу с принудительной вентиляцией UN 750 (Memmert, Германия). Условия разделения аминокислот выполнялись в соотвествии с методом, установленным производителем. Регистрация и обработка хроматограмм проводилась с помощью программы AminoPeak (MembraPure GmbH, Боденхайм, Германия). Идентификация и расчет отдельных соединений осуществлялись с помощью коммерческих стандартов аминокислот, с последующим перерасчетом на содержание белка. Содержание белка выражено в процентах (%), аминокислот – в г/100 г белка. Все данные представлены в перерасчете на сухое вещество. Качество белка семян амаранта оценивали, сравнивая с аминокислотным составом стандартного (идеального белка) по данным отчета ФАО/ВОЗ от 2013 г. путем расчета аминокислотного скора по формуле: (содержание аминокислоты белка семян

амаранта, г/100 г) / содержание аминокислоты стандартного белка, г/100 г) *100 (Dietary protein…, 2013).

Метеорологические условия вегетационного периода 2024 г. в целом были благоприятными для роста и развития амаранта. Температура воздуха каждого месяца превышала средние многолетние значения. Величина гидротермического коэффициента за июнь – август составила 1.3, что характеризует прошедший вегетационный период как достаточно влажный (Ionova et al., 2019).

Статистическая обработка данных проводилась методами дисперсионного (ANOVA) и корреляционного анализов с использованием программ MS Excel 2007 и Statistica v.10.0. Для определения статистической значимости различий использовался тест Тьюки (HSD Тьюки). Для всех параметров рассчитывались описательные статистики (среднее значение, стандартная ошибка среднего значения). Значения коэффициента корреляции Пирсона при $r < 0,3$ считались слабыми, при $0,3 > r > 0,5$ – умеренными, при $0,5 > r > 0,7$ – выраженными, при $0,7 > r > 0,9$ – сильными, при $r > 0,9$ – очень сильными.

Результаты и обсуждение

В зависимости от длины вегетационного периода все вызревшие образцы были сгруппированы в три группы: ультраскороспелые – 87–96 дней от посева (23 образца), скороспелые – 97–106 дней (58 образцов), среднеспелые – 107–114 дней (25 образцов). Видовой состав внутри каждой группы показан на рисунке 1.

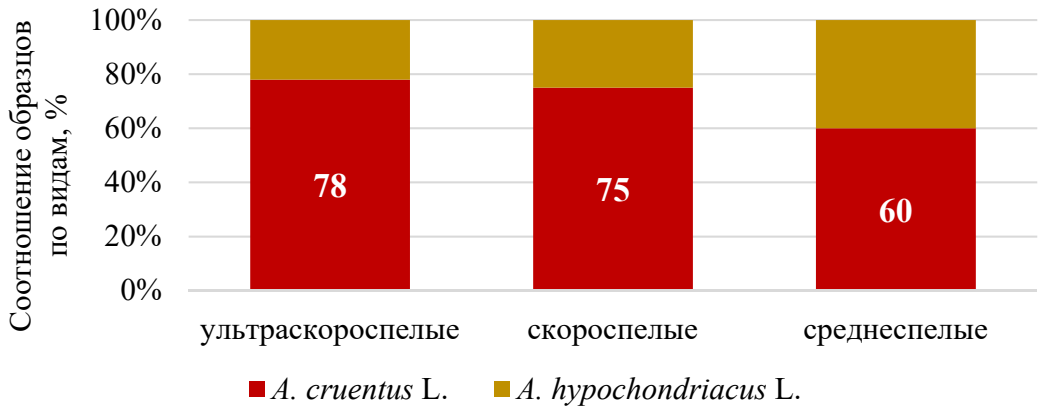


Рис. 1. Видовое соотношение опытных образцов *Amaranthus* L. по группам спелости
Fig. 1. Species ratio of the screened *Amaranthus* L. accessions in the maturity groups

Урожайность

Урожайность семян в среднем составила 2269,3 кг/га, что на уровне сортов зернового амаранта, зарегистрированных в Госреестре РФ (State register…, 2024), а также при выращивании на территориях Украины, Румынии и Италии (Rivelli et al., 2008; Toader et al., 2020; Pelech, 2021). Урожайность семян увеличивалась от более скороспелых к более позднеспелым генотипам. Выявлена значительная вариабельность между образцами по семенной продуктивности (CV = 32,5–65,4%), что расширяет возможность отбора наиболее перспективных для селекции форм.

Содержание белка

Содержание белка в семенах амаранта в среднем составило 13,92% (11,51÷16,17%). Близкие данные были получены исследователями из Гватемалы: протеин варьировал от 12,5 до 16,0% (Bressani et al., 1987). Способность амаранта синтезировать белок в относительно константных значениях при выращивании культуры в очаге происхождения (Центральная Америка) и в Северо-Западном регионе РФ подтверждает крайне высокую пластичность культуры и большой потенциал для культивирования в различных регионах мира. К примеру, в семенах 8 сортов зернового амаранта, выращенных в Австрии и Венгрии, протеин в среднем составил 15,53%, на территории Румынии – 15,20–17,03% (Tömösközi et al., 2009). Этот факт заслуживает внимания селекционеров при выведении высокобелковых сортов.

Выявлено достоверное превышение протеина (+9,7%) в группе ультраскороспелых образцов ($p < 0,05$) (табл. 1). Скороспелые и среднеспелые генотипы накапливали в среднем 13,48% белка. В целом характерна низкая вариабельность уровня протеина между образцами (CV = 4,18–7,93%), что говорит о достаточной стабильности данного показателя. Наши выводы подтверждают исследования при выращивании амаранта в Западной Африке (Нигерия) – авторы также отметили низкую вариабельность уровня протеина у 29 опытных образцов – CV = 2,62% (Akin-Idowu et al., 2016).

Существенных различий по содержанию белка в соответствии со странами происхождения и видовым составом опытных образцов амаранта не отмечено. Однако в исследованиях M. Segura-Nieto et al. (1994) общее содержание белка имело видовые различия и колебалось от 13,2% до 18,4%, что может быть связано с малым количеством опытных образцов в опыте. Хочется отметить, что статистически значимых различий по содержанию белка у образцов с кремовой и черной окраской семян не выявлено.

Аминокислотный состав

Пищевая ценность белка определяется аминокислотным составом, особенно содержанием незаменимых аминокислот. В семенах опытных образцов идентифицировано 17 аминокислот, из которых 7 незаменимых (треонин, валин, метионин, изолейцин, лейцин, фенилаланин, лизин) и три частично заменимые (аргинин, гистидин, тирозин) (рис. 2). Полученные данные согласуются с работами B. Písaříková et al. (2005) и M. Szabóová et al. (2020).

Сумма аминокислот в среднем составила 88,80 г/100 г (табл. 2), незаменимых – 27,65 г/100 г (31,2% от суммы).

Таблица 1. Показатели белка и семенной продуктивности опытных образцов амаранта по группам спелости
Table 1. Protein and seed yield indicators in the screened amaranth accessions classified into maturity groups

Показатель / Indicator		Ультраскороспелые / Ultra-early	Скороспелые / Early	Среднеспелые / Medium-maturing	$НСР_{05}$
Белок, % / Protein, %	Mean	14,80a	13,41b	13,55b	0,61
	SD	0,13	0,14	0,20	
	CV (%)	4,18	7,93	7,28	
Урожайность семян, кг/га / Seed yield, kg/ha	Mean	1447,6a	2421,8b	2938,5b	755,0
	SD	97,9	125,1	400,7	
	CV (%)	32,5	39,3	65,4	

Примечание: CV (%) – коэффициент вариации; SD – стандартное отклонение; $НСР_{05}$ – наименьшая существенная разница; разные буквы указывают на существенные различия по тесту Тьюки HSD ($p < 0,05$)

Note: CV (%) – coefficient of variation; SD – standard deviation; $НСР_{05}$ – the least significant difference; different letters indicate significant differences according to Tukey's HSD test ($p < 0.05$)

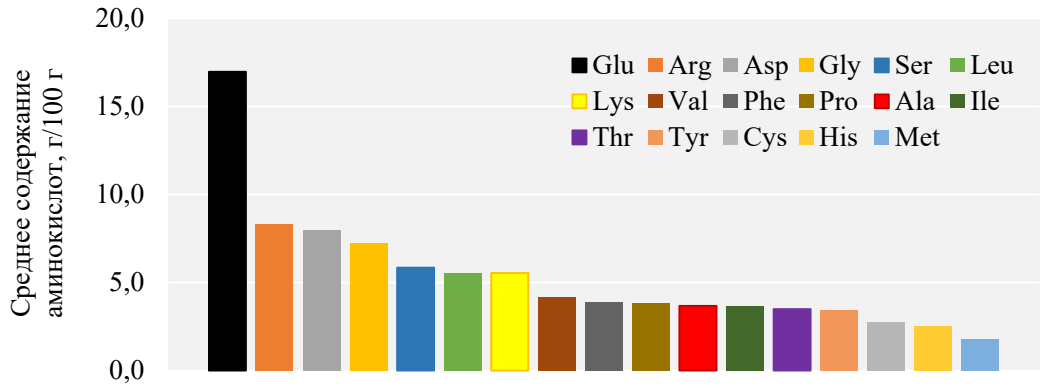


Рис. 2. Аминокислотный профиль опытных образцов амаранта
Fig. 2. The amino acid profile of the screened amaranth accessions

Близкие показатели отмечались при выращивании амаранта на территории Словакии (Szabóová et al., 2020). Можно отметить сильную положительную корреляцию между суммой и содержанием незаменимых аминокислот (r = 0,94) (рис. 3). Существенных различий между группами спелости не обнаружено: сумма аминокислот варьировала в зависимости от уровня спелости незначительно (CV = 7,27÷10,95%), так же как и содержание незаменимых аминокислот (CV = 5,7÷9,68). Это говорит о достаточной стабильности состава и соотношения аминокислот в семенах амаранта. Как было отмечено выше, в группе скороспелых образцов обнаружено повышенное содержание белка, что может объясняться наличием в семенах азотсодержащих непротеиногенных соединений, обуславливающих разницу.

Наиболее представленными аминокислотами были глутаминовая кислота (16,61 г/100 г) и аргинин (7,46 г/100 г), содержание которых между группами спелости существенно не различалось. Близкими к аргинину значениями характеризовались аспарагиновая кислота (7,79 г/100 г) и глицин (7,11 г/100 г). Примечательно, что в группе ультраскороспелых образцов аспарагиновая кислота имела статистически значимое превышение. Известно, что данная аминокислота необходима для синтеза белка, участвует в синтезе других аминокислот, нуклеотидов, органических кислот, сахаров и гормонов, в цикле трикарбоновых кислот, также имеет значение для развития растений и формирования устойчивости к стрессу (Han et al., 2021).

Выявлены различия между группами спелости по содержанию серина (*Ser*). Более скороспелые генотипы характеризовались повышенным содержанием серина. Данная аминокислота играет фундаментальную роль в эмбриогенезе растений, участвует в формировании реакции на абиотические стрессы, особенно на пониженные температуры (Ros et al., 2014).

Одной из наиболее важных незаменимых аминокислот является лизин, суточная потребность в которой для человека составляет 3–5 граммов. Лизин важен для усвоения кальция и транспортировки его к костной ткани человека. Известно, что в семенах амаранта содержится в 2,5 раза больше лизина, чем в зерне пшеницы, в 3 раза больше, чем в зерне кукурузы (Vendemiatti et al., 2008; Sá et al., 2020). В нашем исследовании в семенах амаранта лизин в среднем составлял 5,42 г/100 г. Существенных различий между группами спелости не выявлено. Примечательно, что в листовой биомассе амаранта ранее нами был идентифицирован лизин в бóльшем количестве, чем в семенах – 6,47 г/100 г, а также незаменимая аминокислота – триптофан (Sokolova et al., 2021).

Сравнение качества белка семян амаранта с идеальным (стандартным) с помощью аминокислотного скора показало, что аминокислотный состав амаранта близок

Таблица 2. Содержание идентифицированных аминокислот в 105 образцах амаранта по группам спелости
Table 2. Content of the identified amino acids in 105 amaranth accessions classified into maturity groups

Аминокислота, г/100 г / Amino acid, g/100 g		Группа спелости / Maturity group			Среднее / Average	СИБ, г/100 г / IPC, g/100 g	Амк Скор, % / AAScore, %
		УСк / UEM	Ск / EM	Ср / MM			
		Mean ± SE	Mean ± SE	Mean ± SE	Mean ± SE		
Asp	Aspartic acid	8,29 ± 0,15[a]	7,63 ± 0,14[b]	7,71 ± 0,15[b]	7,79 ± 0,09		140
Thr	Threonine *	3,49 ± 0,07[a]	3,41 ± 0,06[a]	3,44 ± 0,0 7[a]	3,43 ± 0,04	2,50	
Ser	Serine	6,48 ± 0,18[a]	5,46 ± 0,14[b]	5,59 ± 0,18[c]	5,71 ± 0,12		
Glu	Glutamic acid	17,26 ± 0,43a	16,39 ± 0,33[a]	16,51 ± 0,43[a]	16,61 ± 0,22		
Gly	Glycine	7,83 ± 0,20[a]	6,81 ± 0,24[b]	7,16 ± 0,20[a]	7,11 ± 0,16		
Ala	Alanine	3,62 ± 0,07[a]	3,67 ± 0,06[b]	3,58 ± 0,07[a]	3,64 ± 0,04		
Cys	Cysteine	2,91 ± 0,13[a]	2,52 ± 0,14[b]	2,76 ± 0,13[a]	2,66 ± 0,09		
Met	Methionine *	1,78 ± 0,08[a]	1,80 ± 0,06[a]	1,79 ± 0,08[a]	1,79 ± 0,04		204
Cys + Met		4,69	4,32	4,55	4,45	2,30	
Val	Valin *	4,15 ± 0,07[a]	4,11 ± 0,06[a]	4,11 ± 0,07[a]	4,12 ± 0,04	4,00	104
Ile	Isoleucine *	3,66 ± 0,06[a]	3,59 ± 0,05[a]	3,58 ± 0,06[a]	3,60 ± 0,03	3,00	122
Leu	Leucine *	5,59 ± 0,10[a]	5,43 ± 0,09[a]	5,43 ± 0,10[a]	5,47 ± 0,05	6,10	92
Tyr	Tyrosine**	3,48 ± 0,06[a]	3,36 ± 0,06[a]	3,39 ± 0,06[a]	3,39 ± 0,03		
Phe	Phenylalanine*	3,92 ± 0,07[a]	3,80 ± 0,06[a]	3,78 ± 0,07[a]	3,82 ± 0,04		
Tyr + Phe		7,40	7,16	7,17	7,21	4,10	180
His	Histidine **	2,59 ± 0,06[a]	2,45 ± 0,04[a]	2,47 ± 0,06[a]	2,49 ± 0,03	1,60	162
Lys	Lysine *	5,47 ± 0,12[a]	5,37 ± 0,12[a]	5,49 ± 0,12[a]	5,42 ± 0,07	4,80	114
Arg	Arginine**	7,86 ± 0,18[a]	7,02 ± 0,13[a]	8,12 ± 0,18[a]	7,46 ± 0,08		
Pro	Proline	4,27 ± 0,07[a]	4,53 ± 0,06[a]	3,72 ± 0,07[a]	4,28 ± 0,03		
НеАмк/EAA	Σ Min ÷ max	28,06[a] 24,4 ÷ 34,3	27,5[a] 19,2 ÷ 34,2	27,62[a] 25,0 ÷ 34,0	27,65 19,2 ÷ 34,3		

Примечание: УСк – ультраскороспелые; Ск – скороспелые; Ср – среднеспелые образцы амаранта; СИБ – состав идеального белка; Амк Скор – аминокислотный скор семян амаранта по отношению к идеальному белку; * – незаменимые аминокислоты (НеАмк); ** – частично заменимые аминокислоты; Mean ± SE – среднее ± стандартная ошибка; разные буквы указывают на существенные различия по тесту Тьюки HSD ($p < 0,05$)

Note: UEM – ultra-early maturing; EM – early-maturing; MM – medium-maturing; IPC – ideal protein composition; AAScore – amino acid score of amaranth seeds versus the ideal protein; * – essential amino acids (EAA); ** – partially essential amino acids; Mean ± SE – mean ± standard error; different letters indicate significant differences according to Tukey's HSD test ($p < 0.05$)

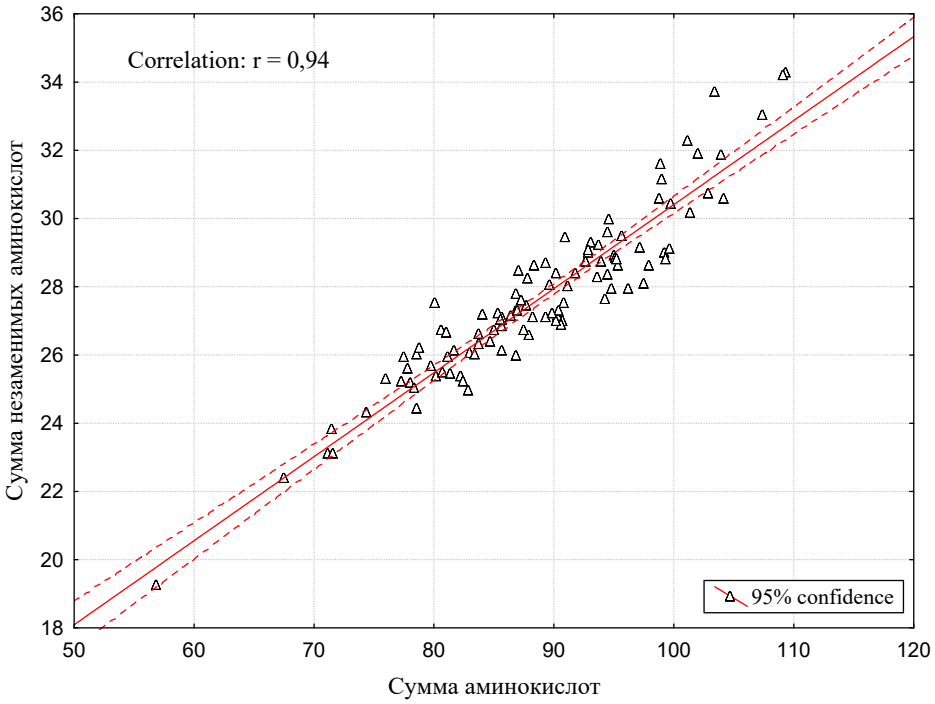


Рис. 3. Взаимосвязь содержания суммы аминокислот и незаменимых аминокислот в семенах амаранта
Fig. 3. Interplay between the sums of total amino acids and essential amino acids in amaranth seeds

к эталонному. Скор аминокислот, кроме лейцина, превышал 100% (см. табл. 2). Лейцин оказался лимитирующей аминокислотой (скор – 92%), однако данный показатель близок к 100% (Lysikov, 2012). Учитывая вышеизложенное, аминокислотный состав семян амаранта можно считать оптимальным для употребления в пищу.

Анализ межвидовых различий показал, что образцы вида *A. cruentus* по ряду аминокислот достоверно превышали *A. hypochondriacus* (табл. 3). Примечательно повышенное содержание ряда незаменимых аминокислот у генотипов вида *A. cruentus*. Этот факт заслуживает внимания селекционеров при создании сортов амаранта с высоким содержанием незаменимых аминокислот в семенах.

Наиболее ценные образцы амаранта

Наибольшим содержанием белка среди ультраскороспелых образцов характеризовались образцы вида *A. hypochondriacus* с кремовыми семенами – вк-765 (Герма-

Таблица 3. Аминокислотный состав семян опытных видов амаранта
Table 3. Amino acid composition in the seeds of the studied amaranth species

Аминокислота, г/100 г / Amino acid, g/100 g		*Amaranthus cruentus* L.			*Amaranthus hypochondriacus* L.		
		Mean	Min÷Max	CV, %	Mean	Min÷Max	CV, %
Asp	Aspartic acid	7,92[a]	5,55÷9,83	10,43	7,42[b]	5,00÷9,82	12,81
Thr	Threonine *	3,48[a]	2,71÷4,37	9,47	3,30[b]	2,26÷3,83	10,15
Ser	Serine	5,81	3,58÷8,12	17,30	5,43	3,21÷8,70	22,31
Glu	Glutamic acid	16,83[a]	12,21÷22,07	11,53	15,93[b]	10,68÷19,55	11,73
Gly	Glycine	7,23	3,90÷9,27	17,88	6,76	1,99÷9,74	23,48
Ala	Alanine	3,67[a]	3,19÷4,8	8,53	3,54[b]	3,25÷3,95	5,22
Cys	Cysteine	2,74	1,03÷4,10	26,16	2,42	0,83÷3,47	30,47
Val	Valin *	4,16[a]	3,42÷5,11	7,72	3,99[b]	3,34÷4,51	6,36
Met	Methionine *	1,82	0,96÷2,75	16,89	1,72	1,11÷2,11	13,77
Ile	Isoleucine *	3,64[a]	2,93÷4,38	7,73	3,47[b]	2,80÷4,02	7,33
Leu	Leucine *	5,53[a]	4,41÷6,70	8,05	5,26[b]	4,05÷6,12	7,94
Tyr	Tyrosine**	3,43[a]	2,65÷4,38	8,56	3,28[b]	2,67÷3,80	7,54
Phe	Phenylalanine*	3,87[a]	3,01÷4,77	8,57	3,69[b]	2,75÷4,36	8,95
His	Histidine **	2,52[a]	1,85÷3,17	10,33	2,39[b]	1,60÷2,90	11,00

Таблица 3. окончание
Table 3. The end

Аминокислота, г/100 г / Amino acid, g/100 g		*Amaranthus cruentus* L.			*Amaranthus hypochondriacus* L.		
		Mean	Min÷Max	CV, %	Mean	Min÷Max	CV, %
Lys	Lysine *	5,49[a]	3,60÷6,94	11,41	5,20[b]	2,92÷5,91	12,10
Arg	Arginine**	7,61	1,64÷9,81	27,13	6,99	1,73÷8,61	32,20
Pro	Proline	4,26	3,12÷10,42	33,96	4,37	3,33÷9,62	42,85

Примечание: * – незаменимые аминокислоты; ** – частично заменимые аминокислоты; CV – коэффициент вариации; разные буквы указывают на существенные различия по тесту Тьюки HSD ($p < 0,05$)

Note: * – essential amino acids; ** – partially essential amino acids; CV – coefficient of variation; different letters indicate significant differences according to Tukey's HSD test ($p < 0.05$)

ния) – 16,17%, вк-723 (Перу) – 15,65%, а также *A. cruentus* с черными семенами – пк-336 (США) – 16%. Образец пк-336 отличался бордовой окраской листьев и низкой урожайностью. Среди скороспелых и среднеспелых генотипов близкими по белку значениями характеризовались только образцы вида *A. hypochondriacus* с кремовыми семенами: пк-334 (Непал) – 16,12%, вк-720 (Перу) – 15,48% и вк-529 (Мексика) – 15,58%.

Из наиболее урожайных генотипов по комплексу признаков выделен среднеспелый *A. cruentus* (пк-423, Мексика) с содержанием белка 14,95%, суммой идентифицированных аминокислот 87,95 г/100 г и массой 1000 семян 0,94 г. Данный образец показал максимальную урожайность (9760 кг/га) и характеризовался наиболее крупными семенами (рис. 4, а). Среди ультраскороспелых генотипов, способных в условиях Северо-Запад-

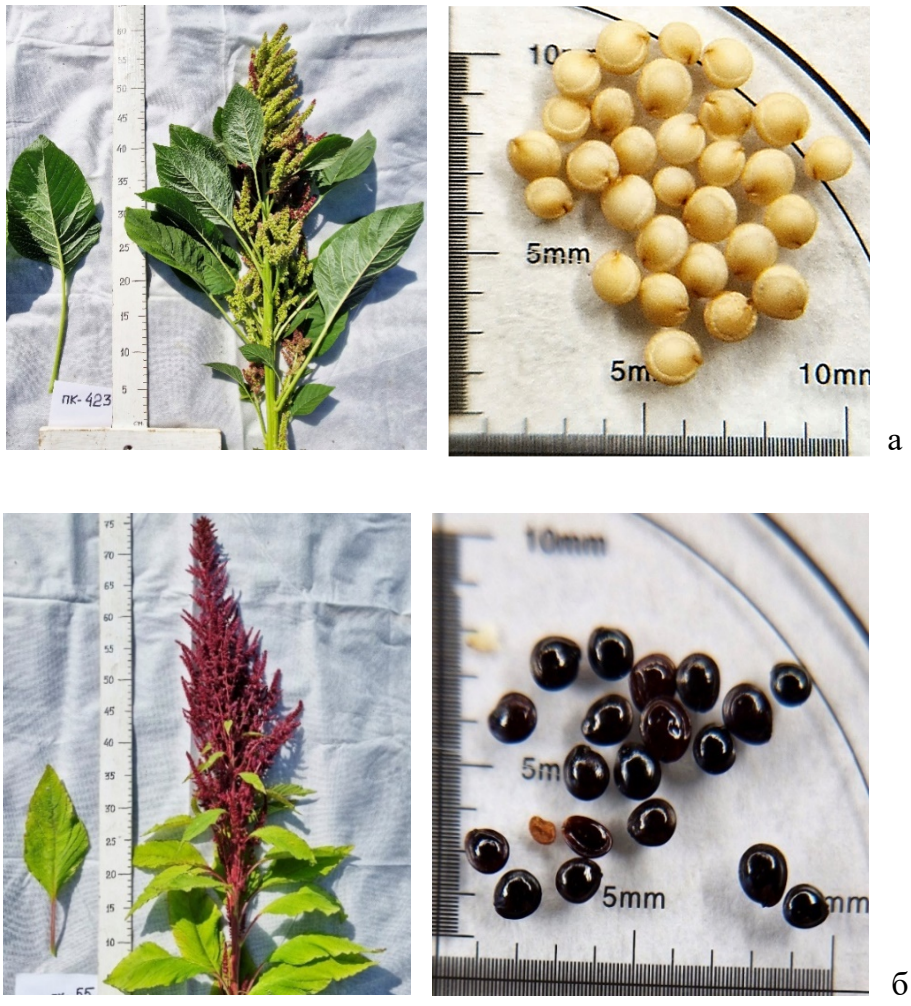


Рис. 4. Соцветие и семена образцов *Amaranthus cruentus* L. (пк-423, Мексика) (а) и *A. cruentus* L. (пк-55, Узбекистан) (б)

Fig. 4. Inflorescence and seeds of *Amaranthus cruentus* L. (pk-423, Mexico) (a) and *A. cruentus* L. (pk-55, Uzbekistan) (б) accessions

ного региона РФ за 87–96 дней формировать урожай семян в 2700 кг/га, по комплексу признаков отмечен образец *A. cruentus* (пк-55, Узбекистан). Выход белка у данного образца составил 14,34%, сумма идентифицированных аминокислот – 97,25 г/100 г (см. рис. 4, б).

Выводы

В результате проведенного исследования впервые определены урожайность семян и содержание в них белка, а также идентифицирован аминокислотный профиль у 105 образцов амаранта из коллекции ВИР при выращивании в нетипичных для культуры условиях Северо-Западного региона РФ. Установлено, что урожайность семян у среднеспелых генотипов (длина вегетационного периода – 107–114 дней) в 2 раза превышает ультраскороспелые с продолжительностью вегетации 87–96 дней.

Для зерновых форм амаранта была характерна низкая вариабельность содержания протеина. Выявлено достоверное превышение уровня белка (+9,7%) в группе ультраскороспелых образцов. Отмечено отсутствие различий в содержании белка у семян с различной окраской.

В аминокислотном профиле семян идентифицировано 17 аминокислот, из которых семь незаменимых и три частично заменимые**.** Состав и соотношение аминокислот в семенах амаранта – достаточно стабильный показатель. Незаменимые аминокислоты в среднем составили 31,2% от суммы. Выявлены различия между группами спелости по содержанию серина, играющего важную роль в формировании реакции растений на абиотические стрессы, особенно на пониженные температуры. Показаны межвидовые различия: образцы вида *A. cruentus* по ряду аминокислот (в том числе незаменимых) достоверно превышали *A. hypochondriacus*.

В результате скрининга выделены ценные генотипы, обладающие высоким содержанием белка и суммы аминокислот, а также с комплексом признаков. Данные образцы рекомендуются для селекционных работ по созданию скороспелых холодостойких сортов зернового амаранта с высоким выходом белка после получения устойчивых показателей хозяйственно ценных признаков в ходе последующего изучения выделившихся в текущем исследовании образцов.

References / Литература

Akin-Idowu P.E., Gbadegesin M.A., Orkpeh U., Ibitoye D.O., Odunola O.A. Characterization of grain amaranth (*Amaranthus* spp.) germplasm in South West Nigeria using morphological, nutritional, and random amplified polymorphic DNA (RAPD) analysis. *Resources*. 2016;5(1):6. DOI: 10.3390/resources5010006

Alvarez-Jubete L., Arendt E.K., Gallagher E. Nutritive value of pseudocereals and their increasing use as functional gluten-free ingredients. *Trends in Food Science and Technology*. 2010;21(2):106-113. DOI: 10.1016/j.tifs.2009.10.014

Bressani R., González J.M., Zúñiga J., Breuner M., Elías L.G. Yield, selected chemical composition and nutritive value of 14 selections of amaranth grain representing four species. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 1987;38(4):347-356. DOI: 10.1002/jsfa.2740380407

Chakraborty S., Chakraborty N., Datta A. Increased nutritive value of transgenic potato by expressing a nonallergenic seed albumin gene from *Amaranthus hypochondriacus*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2000;97(7):3724-3729. DOI: 10.1073/pnas.050012697

Covas G. Publicación miscelánea № 13: Perspectivas del cultivo de los amarantos en la República Argentina. Anguil: Estación Experimental Agropecuaria; 1994. [in Spanish]

Dietary protein quality evaluation in human nutrition. Report of an FAQ Expert Consultation. *FAO Food and Nutrition Paper*. 2013;92:1-66.

Gins M.S., Gins V.K., Motyleva S.M., Baikov A.A., Gins E.M., Koroleva A.K. Composition and antioxidant activity of amino acids in leaves of *Amaranthus tricolor* L. cv. Early Splendor. *Vegetable Crops of Russia*. 2019;(3):96-98. [in Russian] (Гинс М.С., Гинс В.К., Мотылева С.М., Байков А.А., Гинс Е.М., Колорева А.К. Состав и антиоксидантная активность аминокислот в листьях *Amaranthus tricolor* L. сорта Early Splendor. *Овощи России*. 2019;(3):96-98). DOI: 10.18619/2072-9146-2019-3-96-98

Gins M.S., Gins V.K., Motyleva S.M., Kulikov I.M., Medvedev S.M., Kononkov P.F. et al. Mineral composition of amaranth (*Amaranthus* L.) seeds of vegetable and grain usage by ARHIVBSP selection. *Potravinarstvo – Slovak Journal of Food Sciences*. 2018;12(1):330-336. DOI: 10.5219/863

Grobelnik-Mlakar S., Turinek M., Jakop M., Bavec M., Bavec F. Nutrition value and use of grain amaranth: potential future application in bread making. *Agricultura*. 2009;6:43-53.

Han M., Zhang C., Suglo P., Sun S., Wang M., Su T. L-aspartate: an essential metabolite for plant growth and stress acclimation. *Molecules*. 2021;26(7):1887. DOI: 10.3390/molecules26071887

Ionova E.V., Likhovidova V.A., Lobunskaya I.A. Drought and hydrothermal humidity factor as one of the criteria to estimate its intensity degree (literature review). *Grain Economy of Russia*. 2019;(6):18-22. [in Russian] (Ионова Е.В., Лиховидова В.А., Лобунская И.А. Засуха и гидротермический коэффициент увлажнения как один из критериев оценки степени ее интенсивности (обзор литературы). *Зерновое хозяйство России*. 2019;(6):18-22). DOI: 31367/2079-8725-2019-66-6-18-22

Kjeldahl J. A new method for the determination of nitrogen in organic matter. *Zeitschrift für Analytische Chemie*. 1883;22(1):366-382. DOI: 10.1007/BF01338151

Lysikov Yu.A. Amino acids in human nutrition. *Experimental and Clinical Gastroenterology*. 2012;(2):88-105. [in Russian] (Лысиков Ю.А. Аминокислоты в питании человека. *Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология*. 2012;(2):88-105).

Pelech L. Influence of cultivation methods on the formation of individual productivity of amaranth. *Sciences of Europe*. 2021;67(2):21-27. DOI: 10.24412/3162-2364-2021-67-2-21-27

Písaříková B., Kráčmar S., Herzig I. Amino acid contents and biological value of protein in various amaranth species. *Czech Journal of Animal Science*. 2005;50(4):169-174. DOI: 10.17221/4011-CJAS

Raina A., Datta A. Molecular cloning of a gene encoding a seed-specific protein with nutritionally balanced amino acid composition from *Amaranthus*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 1992;89(24):11774-11778. DOI: 10.1073/pnas.89.24.11774

Rascón-Cruz Q., Sinagawa-García S., Osuna-Castro J.A., Bohorova N., Paredes-López O. Accumulation, assembly, and digestibility of amarantin expressed in transgenic tropical maize. *Theoretical and Applied Genetics*. 2003;108(2):335-342. DOI: 10.1007/s00122-003-1430-x

Rastogi A., Shukla S. Amaranth: a new millennium crop of nutraceutical values. *Critical Reviews in Food Science and*

Nutrition. 2013;53(2):109-125. DOI: 10.1080/10408398.2010.517876

Rivelli A.R., Gherbin P., De Maria S., Pizza S. Field evaluation of *Amaranthus* species for seed and biomass yields in southern Italy. *Italian Journal of Agronomy*. 2008;3(3):225-229. DOI: 10.4081/ija.2008.225

Ros R., Muñoz-Bertomeu J., Krueger S. Serine in plants: biosynthesis, metabolism, and functions. *Trends in Plant Science*. 2014;19(9):564-569. DOI: 10.1016/j.tplants.2014.06.003

Sá A.G.A., Moreno Y.M.F., Carciofi B.A.M. Plant proteins as high-quality nutritional source for human diet. *Trends in Food Science and Technology*. 2020;97:170-184. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.01.011

Segura-Nieto M. Biochemistry of amaranth proteins. In: O. Paredes-López (ed.). *Amaranth Biology, Chemistry, and Technology*. Boca Raton, FL: CRC Press; 1994. p.73-105. DOI: 10.1201/9781351069601

Sokolova D., Zvereva O., Shelenga T., Solovieva A. Comparative characteristics of the amino acid composition in amaranth accessions from the VIR collection. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 2021;45(1):68-78. DOI: 10.3906/tar-2007-7

Sokolova D.V. The potential of the VIR grain amaranth collection for cultivation in the northern regions. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*. 2025;25(2):e52252527. DOI: 10.1590/1984-70332025v25n2a07

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). URL: https://mcx.gov.ru/upload/iblock/3bf/zcvfsva67n3wntuboag3pnkzrt4xwnof.pdf [дата обращения: 24.09.2025].

Szabóová M., Záhorský M., Gažo J., Geuens J., Vermoesen A., D'Hondt E. et al. Differences in seed weight, amino acid, fatty acid, and squalene content in γ-irradiation-developed and commercial amaranth varieties (*Amaranthus* spp.). *Plants (Basel)*. 2020;9(11):1412. DOI: 10.3390/plants9111412

Tamás C., Kisgyörgy B.N., Rakszegi M., Wilkinson M.D., Yang M.S., Láng L. et al. Transgenic approach to improve wheat (*Triticum aestivum* L.) nutritional quality. *Plant Cell Reports*. 2009;28(7):1085-1094. DOI: 10.1007/s00299-009-0716-0

Toader M., Ionescu A.M., Şonea C., Georgescu E. Research on the morphology, biology, productivity and yields quality of the *Amaranthus cruentus* L. in the southern part of Romania. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 2020;48(3):1413-1425. DOI: 10.15835/nbha48311973

Tömösközi S., Baracskai I., Schönlechner R., Berghofer E., Lásztity R. Comparative study of composition and technological quality of amaranth. I. Gross chemical composition, amino acid and mineral content. *Acta Alimentaria*. 2009;38(3):341-347. DOI: 10.1556/aalim.38.2009.3.8

Vendemiatti A., Ferreira R.R., Gomes L.H., Medici L.O., Azevedo R.A. Nutritional quality of sorghum seeds: storage proteins and amino acids. *Food Biotechnology*. 2008;22(4):377-397. DOI: 10.1080/08905430802463487

Информация об авторах

Диана Викторовна Соколова, 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, dianasokol@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-9967-7454

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

Татьяна Васильевна Шеленга, 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, tatianashelenga@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-3992-5353

Information about the authors

Diana V. Sokolova, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, dianasokol@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-9967-7454

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

Tatiana V. Shelenga, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, tatianashelenga@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-3992-5353

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 22.10.2025; одобрена после рецензирования 13.12.2025; принята к публикации 22.01.2026.
The article was submitted on 22.10.2025; approved after reviewing on 13.12.2025; accepted for publication on 22.01.2026.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 633.11:664.7
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o5

CC BY

Результаты технологической оценки образцов пшеницы мягкой яровой в условиях Омской области

М. В. Соловьева[1], И. А. Кибкало[1], Б. В. Зырянов[2], И. А. Белан[2], Н. С. Обухова[1], Е. В. Зуев[1]

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

[2] Омский аграрный научный центр, Омск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Мария Викторовна Соловьева, maria.soloveva.97@mail.ru

Актуальность. Селекция на повышения урожайности и качества зерна яровой мягкой пшеницы остается основным направлением селекции для обеспечения продовольственной безопасности страны. В связи с этим необходим поиск новых источников для выполнения этих задач.
Материалы и методы. Объектом исследований были 180 сортов пшеницы мягкой яровой (*Triticum aestivum* L.). Образцы выращивали в 2022–2023 гг. в условиях Омской области. В лаборатории комплексной оценки генетических ресурсов растений ВИР оценили разнообразные признаки технологической оценки и качества зерна. Полученные данные подвергли дисперсионному и корреляционному анализам.
Результаты и заключение. В климатических условиях Омской области, когда во время вегетации, налива и созревания зерна яровой мягкой пшеницы периоды сильной засухи чередуются с избыточным увлажнением, наилучшей дифференцирующей способностью из характеристик качества белкового комплекса обладают некоторые показатели фаринографа и показатель седиментации, на которые и следует ориентироваться в селекции на качество зерна. При этом необходимо контролировать состояние углеводно-амилазного комплекса, как минимум фиксируя число падения, а также отслеживать другие технологические характеристики, например путем регистрации показателя натуры зерна. Выделены образцы, продемонстрировавшие по результатам двулетних испытаний лучшие показатели по натуре зерна и седиментации. Их можно рекомендовать в качестве источников хозяйственно ценных признаков для селекции в условиях Омской области.

Ключевые слова: *Triticum aestivum* L., оценка качества зерна, технологические свойства, седиментация

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту № 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».

Для цитирования: Соловьева М.В., Кибкало И.А., Зырянов Б.В., Белан И.А., Обухова Н.С., Зуев Е.В. Результаты технологической оценки образцов пшеницы мягкой яровой в условиях Омской области. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(1):40-48. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o5

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

© Соловьева М.В., Кибкало И.А., Зырянов Б.В., Белан И.А., Обухова Н.С., Зуев Е.В., 2026

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o5

Technological assessment results for spring bread wheat accessions in Omsk Province

Maria V. Solovieva[1], Iliya A. Kibkalo[1], Boris V. Zyryanov[2], Igor A. Belan[2], Natalia S. Obukhova[1], Evgeny V. Zuev[1]

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

[2] *Omsk Agricultural Scientific Center, Omsk, Russia*

Corresponding author: Maria V. Solovieva, maria.soloveva.97@mail.ru

Background. Higher yields and better quality of spring bread wheat grain remains the main focus for wheat breeders in their efforts to ensure national food security. Therefore, searching for new sources to fulfill this mission is an important task.
Materials and methods. The research material included 180 accessions of spring bread wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in 2022–2023 in Omsk Province. Various indicators for technological assessment and grain quality testing were analyzed at the VIR Laboratory of Integrated Plant Genetic Resources Evaluation. The resulting data underwent variance and correlation analyses.
Results and conclusion. Considering the climate in Omsk Province, where severe droughts alternate with excessive moisture periods during the growing season of spring bread wheat and the phases of grain filling and ripening, a number of farinograph indicators and the sedimentation index have the best differentiating ability among the protein complex quality characters, so they should be used in breeding for grain quality. It is also necessary to monitor the state of the carbohydrate-amylase complex, at least at the level of recording the falling number, as well as other technological properties, for example, though the registration of the grain test weight. Accessions with the best values of the grain test weight and sedimentation were identified. They can be recommended for breeders as sources of valuable agronomic traits in Omsk Province.

Keywords: *Triticum aestivum* L., grain quality assessment, technological properties, sedimentation

Acknowledgments: the work was performed within the framework of the state task according to the thematic plan of VIR, 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”.

For citation: Solovieva M.V., Kibkalo I.A., Zyryanov B.V., Belan I.A., Obukhova N.S., Zuev E.V. Technological assessment results for spring bread wheat accessions in Omsk Province. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(1):40-48. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o5

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal’s opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

В России пшеница – основная продовольственная культура. В мировом земледелии пшеница занимает наибольшую площадь среди других зерновых культур. По данным ФАО, в 2022 г. мировая посевная площадь под пшеницей составила 242,7 млн га, валовый сбор – 946,2 млн т, при средней урожайности 34,5 ц/га. Первое место по площадям занимала Индия, 2-е – Россия, 3-е –Китай. По валовому производству пшеницы Россия на 3-м месте в мире (http://www.fao.org/faostat/ru).

По данным Росстата, в России в 2024 г. яровая пшеница высевалась на площади 12,3 млн га, собрано 29,0 млн т, средняя урожайность культуры – 21,4 ц/га. Также для яровой мягкой пшеницы наблюдали небольшое снижение всех показателей (https://rosstat.gov.ru).

Омская область вошла в двадцатку крупнейших регионов страны по посевным площадям пшеницы. Объем площадей, занятых пшеницей мягкой яровой в Омской области, в 2021 г. – 1,29 млн га, в 2022 г. – 1,19 млн га, в 2023 г. – 1,16 млн га, из них более 90% занимали сортовые посевы. Доля сортов селекции Омского аграрного научного центра (АНЦ) достигла 60–70% от общих посевов пшеницы мягкой яровой (https://ab-centre.ru).

Из 33 сортов яровой мягкой пшеницы селекции Омского АНЦ, включенных в Реестр селекционных достижений РФ на 2024 г., сильными сортами являются 14, ценными – 14 (https://gossortrf.ru/registry).

В России приоритетным остается направление селекции, ориентированное на высокую урожайность, адаптивность и качество зерна (Zhuchenko, 2010). Возросшие потребности населения в высококачественных хлебобулочных изделиях, а также развитие хлебного экспорта страны определяют необходимость создания новых «сильных» и «ценных» сортов пшеницы (Malkanduev et al., 2022).

Для успешной реализации данных задач необходим комплексный подход к скринингу и оценке селекционного материала – поиск новых источников качества зерна среди разнообразных отечественных и зарубежных сортов. В современном производстве особое внимание уделяется идентификации сортов, способных обеспечить сырьевую базу для хлебопекарной и экспортной отраслей, что требует системного изучения показателей качества зерна и его технологических свойств в конкретных агроэкологических условиях выращивания.

Целью исследований являлось изучение качества зерна и его технологических свойств сортов пшеницы мягкой яровой отечественной и зарубежной селекции, выращенных в условиях Омской области, для выявления источников качества зерна.

Материал, условия и методы

В исследовании изучались 180 образцов пшеницы мягкой яровой (*Triticum aestivum* L.) из коллекции Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР) и генбанка IPK (Institut für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung, Гатерслебен, Германия). По происхождению они распределялись следующим образом: Германия – 90, Россия – 88, Казахстан – 7, Нидерланды – 1. Российские пшеницы включают образцы из 24 регионов РФ. Особенно широко представлены Алтайский край, Омская и Новосибирская области.

Образцы выращивали в 2022 и 2023 г. на базе селекционного севооборота лаборатории Омского АНЦ в зоне южной лесостепи Омской области по полной селекционной схеме. Предшественник – пар. Осенью предшествующего года механическая обработка почвы проводилась многофункциональным культиватором «Степняк» на глубину 10–12 см. Весной для закрытия влаги применялось боронование БЗСС-1. Перед посевом проводилась культивация культиватором «Степняк» на глубину 6–8 см. Площадь делянки составила 1 м^2, повторность двукратная.

По метеорологическим условиям 2022 г. характеризовался как недостаточный по увлажнению (гидротермический коэффициент в мае – августе: ГТК = 1,00), однако он был очень контрастным как по декадам (от отсутствия осадков до избытка увлажнения, ГТК = 4,03), так и по месяцам (от сильной засухи в мае, ГТК = 0,45, до избыточного увлажнения в июле, ГТК = 1,90).

По метеорологическим условиям 2023 г. также характеризовался как недостаточный по увлажнению (ГТК мая – августа = 0,84), однако он был очень контрастным по декадам – от отсутствия осадков (I декада мая и II сентября) до избытка (III декада июня, 150,4% от среднемноголетней). В целом вегетационный период текущего года характеризовался как засушливый (по месяцам ГТК колебался 0,77 до 93) (рисунок).

Вегетационные периоды 2022 и 2023 г. характеризовались нестабильностью метеорологических условий с чередованием засухи и избытка влаги, при общем дефиците увлажнения в вегетационный период.

В лаборатории комплексной оценки генетических ресурсов растений ВИР провели оценку качества зерна

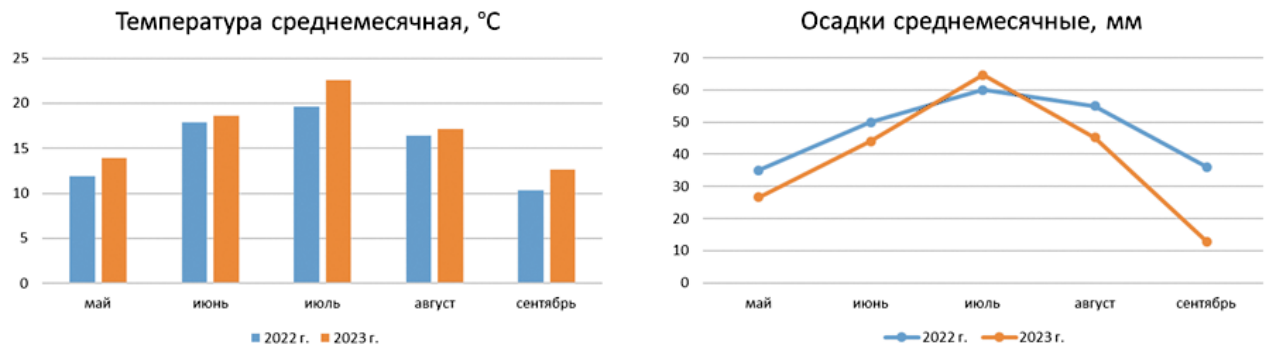


Рисунок. Графики среднемесячных температур воздуха и распределения осадков по месяцам в Омской области (2022–2023 гг.)

Figure. Graphs of mean monthly air temperatures and monthly precipitation distribution in Omsk Province (2022–2023)

и его технологических свойств. Определяли натуру зерна на микропурке (Vasilenko, Komarov, 1987), стекловидность на диафаноскопе (GOST 10987-76…, 2009), показатель SDS-седиментации (Bebiakin, Buntina, 1991). Также, с помощью инфракрасного анализатора IM 9500 (Perten), определяли содержание протеина, зольность и цвет (белизну) цельносмолотого зерна согласно инструкции к прибору. Проведена более углубленная оценка качества зерна образцов урожая 2022 г. Проведено фаринографирование (GOST ISO 5530-1-2013…, 2014) и амилографирование (GOST ISO 7973-2013…, 2014) на соответствующих приборах фирмы Brabender в микромодификации, определено число падения (ЧП) на приборе ПЧП 7 (GOST ISO 3093-2016…, 2016), количество и качество сырой клейковины (GOST R 54478-2011…, 2012) с помощью прибора ИДК-3М. Кроме этого, определяли содержание сухой клейковины, растяжимость и расплываемость сырой клейковины (Pumpyansky, 1971), расплываемость клейковины при высушивании. Полученные данные подвергли дисперсионному и корреляционному анализам.

Результаты и обсуждение

Результаты дисперсионного анализа показали, что все критерии качества зерна, изучавшиеся два года, существенно, по значимости F-критерия, дифференцировали экспериментальный материал (табл. 1). Однако выявились и существенные различия по выраженности признаков между годами. Таким образом, очевиден заметный вклад в изменчивость данных признаков как генотипа, так и условий года. Значимость вклада генотипа подчеркивает и величина коэффициентов генетической корреляции (r_a) (Gorlov et al., 2014), отражающих взаимосвязь выраженности одноименных признаков у сопредельных генераций. Как видно по этому критерию, наибольшее влияние года испытывали показатели объема седиментационного осадка и полной стекловидности.

Результаты определения количества и качества клейковины зерна урожая 2022 г. представлены в таблице 2.

Полученные данные показали, что проанализированный материал обладал специфическими свойствами. Содержание сырой клейковины, как и содержание белка, оказалось очень высоким (0,88**) (см. табл. 1). Оно доходило до 70%, а среднее по опыту составило 54,7% при норме 28%. Такое положение дел не могло не отразиться на качестве клейковины, которое часто находится в антагонизме к ее количеству. Почти весь набор образцов оказался в 3-й группе качества по индексу деформации клейковины (ИДК) – неудовлетворительно слабая или в некоторых случаях на границе с этой группой. Клейковина в целом характеризовалась сильной растяжимостью и довольно сильной расплываемостью. Тем не менее в числовом выражении получена определенная дифференциация образцов. По коэффициенту вариации хорошо разграничивала материал только растяжимость клейковины, на среднем уровне – содержание сырой и сухой клейковины, ее расплываемость при высушивании, на низком уровне – гидратация, расплываемость сырой клейковины и показатель ИДК. Впрочем, для показателя ИДК это обычный уровень дифференциации в пределах одного опыта, за что он часто подвергается критике как селекционный признак (Kazartseva et al., 1983). Данные фариографической оценки образцов мягкой пшеницы урожая 2022 г. представлены в таблице 3.

Несмотря на то что ни один из образцов в данном опыте не сформировал зерно, которое можно было бы отнести к сильным пшеницам (выше 80 единиц валориметра) (Krasnov et al., 2016), все показатели фариографа, кроме ВПС, хорошо разграничивали экспериментальный материал, если судить по коэффициенту вариации. Данные реологических испытаний теста подтверди-

Таблица 1. Дифференцирующая способность показателей технологической оценки зерна на урожае 2022–2023 гг. (Омская область)

Table 1. Differentiating ability of technological assessment indicators for wheat grain harvested in 2022–2023 (Omsk Province)

Показатель	Пределы варьирования		Средняя по опыту		F-критерий, годы	F-критерий, сорта	НСР	r_a
	2022 г.	2023 г.	2022 г.	2023 г.				
Натура, г/л	601–810	580–807	736	717	83,3*	9,0*	37,1	0,80**
Стекловидность полная, %	0–61	0–16	5,4	1,3	74,1*	2,0*	8,86	0,59**
Стекловидность общая, %	24–80	22–56	44,3	41,8	35,1*	5,8*	7,7	0,72**
Объём осадка седиментации, мл	20–89	20–72	60,8	46,9	304,3*	3,4*	14,8	0,57**
Содержание протеина, %	14,3–25,0	16,6–26,7	19,4	22,0	713,3*	9,0*	1,75	0,80**
Зольность, %	1,60–2,88	1,51–3,00	2,17	2,20	4,9*	6,7*	0,26	0,75**
Цвет (белизна), %	59,4–83,3	70,6–85,0	77,9	81,2	137,7*	3,0*	5,1	0,69**

Примечание * – значимость F-критерия; ** – здесь и далее коэффициент корреляции значим на уровне 0,01%

Note: * – significance of the F test; ** – the correlation coefficient is hereinafter statistically significant at the 0.01% level

Таблица 2. Дифференцирующая способность показателей количества и качества клейковины
(урожай 2022 г., Омская область)

Table 2. Differentiating ability of gluten quantity and quality indicators
(harvest of 2022, Omsk Province)

Показатели	Содержание сырой клейковины, %	ИДК, ед. пр.	Растяжимость, см	Содержание сухой клейковины, %	Гидратация, %	Расплываемость сырой клейковины, мм	Расплываемость клейковины при сушке, мм
Средняя по опыту	54,7	107,1	50,5	18,8	192,1	35,3	91,8
Стандартная ошибка	0,48	0,40	1,27	1,16	0,70	0,23	0,96
Амплитуда колебания	31,8	26,2	96,5	11,1	59	15	65
Пределы варьирования	38,4–70,2	94–120,2	23,5–120,0	13,6–24,7	156–215	27–42	65–130
Коэффициент вариации	11,5	4,8	32,2	11,9	4,36	8,61	13,5

Таблица 3. Дифференцирующая способность показателей фаринографирования
(урожай 2022 г., Омская область)

Table 3. Differentiating ability of farinograph indicators
(harvest of 2022, Omsk Province)

Показатели	ВПС, %	ВОТ, мин	Стабильность теста, мин	Разжижение теста, ед. пр.	Число валориметра, ед. пр.
Средняя по опыту	69,5	3,1	1,5	99,3	46,8
Стандартная ошибка	0,2	0,1	0,1	2,9	0,7
Амплитуда колебания	14	5,2	5,4	213	43
Пределы варьирования	64–78	1,0–6,2	0,4–5,8	22–235	21–64
Коэффициент вариации	3,2	30,6	53,9	39,7	18,5

Примечание: ВПС – водопоглотительная способность; ВОТ – время образования теста

Note: ВПС is the water absorption capacity; BOT is the time of dough formation

ли невысокую оценку физических свойств клейковины. Наиболее высокую взаимосвязь они имели с показателем ИДК (0,49**–0,56**).

Состояние углеводно-амилазного комплекса зерна пшеницы обычно не зависит от свойств белкового комплекса, при этом оно является важной составляющей определения технологической ценности зерна (GOST R 51228-98…, 1999). Для быстрой обобщенной характеристики углеводно-амилазного комплекса используют показатель числа падения (ЧП), который также часто используют для обнаружения активности альфа-амилазы в зерне. Более углубленным способом изучения этого комплекса считается амилографирование. Изучению подвергли зерно урожая 2022 г. В процессе амилографирования регистрировали следующие показатели: время начала клейстеризации (А1); вязкость начала клейстеризации (А2); температура начала клейстеризации (А3); время наступления максимальной вязкости клейстера (А4); максимальная вязкость клейстера, или высота амилограммы (А5), температура максимальной вязкости клейстера (А6); вязкость клейстера на конец испытания (А7) (табл. 4).

На высоком уровне, по коэффициенту вариации, дифференцировали изучаемый материал следующие показатели состояния углеводно-амилазного комплекса: число падения (ЧП), максимальная вязкость клейстера (А5), вязкость клейстера в конце амилографического испытания (А7). По ГОСТ 9353-2016 «Пшеница. Технические условия» (GOST 9353-2016…, 2019) к 1–2-му классу может быть отнесено зерно мягкой пшеницы с ЧП не менее 200 с, к 3-му классу – не менее 150 с, к 4-му классу – не менее 80 с. В изученной выборке по ЧП к 3-му классу можно отнести 21 образец, к 4-му классу – 20 образцов и к 5-му классу – 21 образец. Остальные соответствовали 1–2-му классу и также значительно различались между собой. Как известно, на выраженность числа падения может влиять как активность альфа-амилазы, которую связывают с ростовыми процессами в зерне, так и технические свойства самого крахмала. Значительная дифференциация образцов по этому показателю с достаточно большим процентом образцов с самыми низкими значениями ЧП говорит о том, что складывающиеся условия во время созревания зерна были провокационными для активации альфа-амилазы. Действительно, почти вся вегетация со-

Таблица 4. Дифференцирующая способность показателей состояния углеводно-амилазного комплекса (урожай 2022 г., Омская область)

Table 4. Differentiating ability of indicators for the state of the carbohydrate-amylase complex (harvest of 2022, Omsk Province)

Показатели*	ЧП, с	А1, мин	А2, ед. пр.	А3, °С	А4, мин	А5, ед. пр.	А6, °С	А7, ед. пр.
Средняя по опыту	241,1	5,0	31,3	68,8	7,5	267,4	85,7	189,7
Стандартная ошибка	8,1	0,02	0,1	0,1	0,1	0,01	0,4	10,0
Амплитуда колебания	400	2,1	20	11,7	3,6	597	23,6	497
Пределы варьирования	60–460	4,1–6,2	21–41	64,5–76,2	5,0–8,6	36–633	68,8–92,4	10–507
Коэффициент вариации	44,4	4,9	4,6	2,6	11,2	50,4	6,3	69,5

Примечание: *– расшифровка показателей представлена в тексте

Note: * – the indicators are interpreted in the text

провождалась чередованием острых засух с избыточными осадками выше нормы, что могло привести к формированию высокобелкового зерна и спровоцировать ростовые процессы в зерне у генотипов, неустойчивых к прорастанию на корню.

Таким образом, выделились и генотипы, которые могут рассматриваться как источники устойчивости к данному процессу. Обращает на себя внимание, что из 62 генотипов, сформировавших зерно с ЧП ниже 2-го класса, 53 оказались сортами зарубежной селекции, что говорит об их низкой адаптивности к подобным местным условиям. С данными ЧП в основном согласуются результаты амилографической оценки. Так, с данными заключительной фазы амилографирования – температура максимальной вязкости клейстера (А6), время максимальной вязкости (А4), максимальная вязкость (высота амилограммы, А5), вязкость в конце испытания (А7) – выявлена существенная сопряженность высокого уровня (0,73**–0,76**). С началом клейстеризации выявлена существенная средняя корреляция с содержанием белка в зерне: время начала клейстеризации (0,37**), температура начала клейстеризации (0,43**). Подобную картину мы уже отмечали ранее (Kibkalo et al., 2024) на примере овса. Связано это, видимо, с наступлением во время испытания температур, критических для денатурации белка. В основном же принято считать, что показатели амилографирования несут независимую от белкового комплекса информацию.

Так же в общей системе признаков с показателями завершающей стадии амилографирования зерна урожая 2022 г. оказалась связана натура зерна, причем в оба года испытаний на одинаковом уровне (0,52**–0,56**). Она также была связана и с числом падения (0,54**–0,58**). С натурой зерна подобным же образом коррелировала общая стекловидность (0,59**–0,69**), белизна муки (0,41**–0,65**), отрицательная взаимосвязь обнаружена с зольностью (–0,63**…–0,75**). Все это укладывается в адекватную картину: хорошо выполненное зерно обладает высокой натурой, не истощено ростовыми процессами, отчего имеет высокие значения реологии клейстера и стекловидности, соотношение эндосперма и оболочки смещено в сторону эндосперма, отсюда повышенная белизна и пониженная зольность.

Показатель экспресс-оценки качества запасных белков зерна – величина осадка SDS-микроседиментации – оказался на среднем уровне связанным с данными ИДК и фаринографа, что объяснимо с точки зрения проблем дифференциации материала в данном опыте у реологических показателей (слабая клейковина и низкое значение числа валориметра). Причем по размерности величина коэффициента корреляции при оценке сопредельной генерации урожая 2023 г. оказалась даже выше, что подчеркивает генетическую детерминированность данного признака и говорит о возможности использования его для селекционной оценки. Так, взаимосвязь объема седиментационного осадка с показателем ИДК, который имеет отрицательную выраженность, составила –0,36**…–0,41**, с временем образования теста – 0,34**–0,55**, с разжижением теста – –0,39**…–0,56**, с числом валориметра – 0,38**–0,58**.

По результатам двулетних испытаний, натуру зерна на уровне 1–2-го класса (от 750 мг/л) показали 59 образцов, 57 из которых – отечественной селекции. Лучшими по признаку (более 780 мг/л) были сорта: ‘Алтайская’, ‘Американка’, ‘Саксонка’, ‘Сибирка 1818’, ‘Цезиум 31’, ‘Алтайская 98’, ‘Кантегирская 89’, ‘Новосибирская 67’, ‘Новосибирская 89’, ‘Омская 11’, ‘Саратовская 39’, ‘Сибирская 12’, ‘Сибирячка 4’, ‘Фора’. По объему седиментационного осадка (от 70 мл) по двухлетним данным выделились образцы: ‘Алтайская’, ‘Альбидум 3700’, ‘Гальянка’, ‘Голоколоска’, ‘Сибирячка’, ‘Цезиум 31’, ‘Новосибирская 15’, ‘Саратовская 39’, ‘Сибирская 12’, ‘Целинная 20’, ‘Целинная 60’, ‘Perso’.

Полученные закономерности согласуются с опубликованными ранее наблюдениями по мягкой пшенице: высокий протеин нередко сопровождается снижением показателей качества клейковины и валориметра, что отражает известный компромисс «количество ↔ качество» глютеновых белков (Payne et al., 1987; Shewry, Halford, 2002); число падения и амилографические параметры (А5, А7) чутко реагируют на чередование засушливых и переувлажненных периодов в фазу налива, выступая индикаторами склонности к предуборочному прорастанию и/или LMA (Mares, Mrva, 2014); натура зерна положительно сопряжена с общей стекловидностью и «белизной» муки и отрицательно – с зольностью, что указывает на лучшее выполнение эндосперма у образцов с высокими технологическими свойствами (Dowell et al., 2006; Newberry et al., 2018). На этом фоне диапазон варьирования и коэффициенты вариации наших показателей (особенно для ЧП, А5, А7 и числа валориметра) сопоставимы или превышают опубликованные диапазоны

для северо-восточных зон возделывания, что объясняется более контрастным гидротермическим режимом в годы испытаний и широкой географией происхождения материала (Fairlie et al., 2024). Таким образом, наши результаты не только подтверждают общие тренды, но и расширяют эмпирическую базу для континентально-аридных условий Омской области, где сочетание «жесткого» белкового профиля с устойчивостью углеводно-амилазного комплекса определяет пригодность зерна для хлебопечения и экспорта.

Заключение

В климатических условиях Омской области, когда во время вегетации, налива и созревания зерна яровой мягкой пшеницы периоды сильной засухи чередуются с избыточным увлажнением, наилучшей дифференцирующей способностью из характеристик качества белкового комплекса обладают некоторые показатели фариографа и показатель седиментации, на которые и следует ориентироваться в селекции на качество зерна. При этом необходимо контролировать состояние углеводно-амилазного комплекса, хотя бы на уровне регистрации числа падения, а также другие технологические свойства, по крайней мере на уровне регистрации натуры зерна.

В качестве практического результата двулетних испытаний выделены источники технологических признаков для условий Омской области. По натуре зерна на уровне 1–2-го класса (≥ 750 г/л) стабильно выделились 59 образцов (преимущественно отечественной селекции), среди которых: ‘Алтайская’, ‘Американка’, ‘Саксонка’, ‘Сибирка 1818’, ‘Цезиум 31’, ‘Алтайская 98’, ‘Кантегирская 89’, ‘Новосибирская 67’, ‘Новосибирская 89’, ‘Омская 11’, ‘Саратовская 39’, ‘Сибирская 12’, ‘Сибирячка 4’, ‘Фора’; по SDS-седиментации (≥ 70 мл) – ‘Алтайская’, ‘Альбидум 3700’, ‘Гальянка’, ‘Голоколоска’, ‘Сибирячка’, ‘Цезиум 31’, ‘Новосибирская 15’, ‘Саратовская 39’, ‘Сибирская 12’, ‘Целинная 20’, ‘Целинная 60’, ‘Perso’. Дополнительно, по числу падения в стрессовых погодных условиях, отмечены образцы, сохраняющие высокие значения ЧП и высокую вязкость клейстера (А5, А7), что указывает на устойчивость к предуборочному прорастанию и пригодность для хлебопекарных целей. Учитывая выявленные эффекты «генотип × год», рекомендуем использовать перечисленные генотипы как источники признаков в скрещиваниях для конструирования сортов с сочетанием высокой натуры, благоприятных реологических характеристик и стабильности углеводно-амилазного комплекса.

References / Литература

AB-Center. Agribusiness Expert and Analytical Center: [website]. [in Russian] (АБ-Центр. Экспертно-аналитический центр агробизнеса: [сайт]). URL: https://ab-centre.ru [дата обращения: 26.02.2025].

Bebiakin V.M., Buntina M.V. The effectiveness of assessing the grain of spring bread wheat by the SDS test (Effektivnost otsenki zerna yarovoy myagkoy pshenitsy po SDS-testu). *Agrarian Science*. 1991;(1):66-70. [in Russian] (Бебякин В.М., Бунтина М.В. Эффективность оценки зерна яровой мягкой пшеницы по SDS-тесту. *Аграрная наука*. 1991;(1):66-70).

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

Dowell F.E., Maghirang E.B., Xie F., Lookhart G.L., Pierce R.O., Seabourn B.W. et al. Predicting wheat quality characteristics and functionality using near-infrared spectroscopy. *Cereal Chemistry*. 2006;83(5):529-536. DOI: 10.1094/CC-83-0529

Fairlie W., Hughes D., Cullis B., Edwards J., Kuchel H. Genotype-by-environment interaction for wheat falling number performance due to late maturity α-amylase. *Crop Science*. 2024;64(6):3202-3218. DOI: 10.1002/csc2.21348

Federal State Statistics Service (Rosstat): [website]. [in Russian] (Федеральная служба государственной статистики (Росстат): [сайт]). URL: https://rosstat.gov.ru [дата обращения: 19.03.2025].

Food and Agriculture Organization of the United Nations: [website]. [in Russian] (Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН: [сайт]). URL: http://www.fao.org/faostat/ru [дата обращения: 02.11.2024].

Gorlov A.A., Gorlova N.A., Gorlov A.I. New in the methodology of determining genetic correlations (Novoye v metodike opredeleniya geneticheskikh korrelyatsiy). *Young Scientist*. 2014;7(66):201-203. [in Russian] (Горлов А.А., Горлова Н.А., Горлов А.И. Новое в методике определения генетических корреляций. *Молодой ученый*. 2014;7(66):201-203).

GOST 10987-76. Interstate standard. Grain. Methods for determination of vitreousness. Moscow: Standartinform; 2009. [in Russian] (ГОСТ 10987-76. Межгосударственный стандарт. Зерно. Методы определения стекловидности. Москва: Стандартинформ; 2009). URL: https://docs.cntd.ru/document/1200024313 [дата обращения: 19.03.2025].

GOST 9353-2016. Interstate standard. Wheat. Specifications. Official edition. Moscow: Standartinform; 2019. [in Russian] (ГОСТ 9353-2016. Межгосударственный стандарт. Пшеница. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2019). URL: https://www.internet-law.ru/gosts/gost/62924 [дата обращения: 19.03.2025].

GOST ISO 3093-2016. Interstate standard. Wheat, rye and their flours, durum wheat and durum wheat semolina – Determination of the falling number according to Hagberg–Perten IDT. Moscow: Standartinform; 2016. [in Russian] (ГОСТ ISO 3093-2016. Межгосударственный стандарт. Зерно и продукты его переработки. Определение числа падения методом Хагберга – Пертена. Москва: Стандартинформ; 2016). URL: https://meganorm.ru/Data2/1/4293751/4293751055.pdf [дата обращения: 19.03.2025].

GOST ISO 5530-1-2013. Interstate standard. Wheat flour. Physical characteristics of the dough. Part 1. Determination of water absorption and rheological properties using a farinograph. Moscow: Standartinform; 2014. [in Russian] (ГОСТ ISO 5530-1-2013. Межгосударственный стандарт. Мука пшеничная. Физические характеристики теста. Часть 1. Определение водопоглощения и реологических свойств с применением фариографа. Москва: Стандартинформ; 2014). URL: https://meganorm.ru/Data2/1/4293781/4293781265.pdf [дата обращения: 19.03.2025].

GOST ISO 7973-2013. Interstate standard. Grain and cereal products. Determination of the viscosity using an amylograph. Moscow: Standartinform; 2014. [in Russian] (ГОСТ ISO 7973–2013. Межгосударственный стандарт. Зерно и зернопродукты. Определение вязкости с применением амилографа. Москва: Стандартинформ; 2014). URL: https://meganorm.ru/

Data2/1/4293772/4293772909.pdf [дата обращения: 19.03.2025].

GOST R 51228-98 (ISO 3983-77). National standard of the Russian Federation. Grain and cereal products. Determination of alpha-amylase activity. Colorimetric method. Moscow: Gosstandart; 1999. [in Russian] (ГОСТ Р 51228-98 (ИСО 3983-77). Государственный стандарт Российской Федерации. Зерно и зерновые продукты. Колориметрический метод определения активности альфа-амилазы. Москва: Госстандарт; 1999). URL: https://meganorm.ru/Data/90/9079.pdf [дата обращения: 19.03.2025].

GOST R 54478-2011. National standard of the Russian Federation. Grain. Methods for determination of quantity and quality of gluten in wheat. Moscow: Standartinform; 2012. [in Russian] (ГОСТ Р 54478-2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Зерно. Методы определения количества и качества клейковины в пшенице. Москва: Стандартинформ; 2012). URL: https://docs.cntd.ru/document/1200087804 [дата обращения: 19.03.2025].

Kazartseva A.T., Vorobyeva R.A., Borodulina N.V. The degree of conformity of the readings of the IDK-1 device with the true grain quality (Stepen sootvetstviya pokazaniy pribora IDK-1 istinnomu kachestvu zerna). *Selektsiya i semenovodstvo = Plant Breeding and Seed Production*. 1983;(4):19-20. [in Russian] (Казарцева А.Т., Воробьева Р.А., Бородулина Н.В. Степень соответствия показаний прибора ИДК-1 истинному качеству зерна. *Селекция и семеноводство*. 1983;(4):19-20).

Kibkalo I.A., Loskutov I.G., Voitsutskaya N.P., Solovyova M.V., Obukhova N.S., Blinova E.V. Development of methodological approaches to assessing the technological properties of oat grain. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2024;7(2):6-15. [in Russian] (Кибкало И.А., Лоскутов И.Г., Войцуцкая Н.П., Соловьева М.В., Обухова Н.С., Блинова Е.В. Разработка методических подходов к оценке технологических свойств зерна овса. *Биотехнология и селекция растений*. 2024;7(2):6-15). DOI: 10.30901/2658-6266-2024-2-o2

Krasnov I.N., Kravchenko I.A., Kravchenko N.S. Biochemical characteristics of grain and biotechnology of reception of products of its processing. *Modern Technics and Technologies*. 2016;10(62):86-98. [in Russian] (Краснов И.Н., Кравченко И.А., Кравченко Н.С. Биохимические характеристики зерна и биотехнология получения продуктов его переработки. *Современная техника и технологии*. 2016;10(62):86-98).

Malkanduev Kh.A., Shamurzaev R.I., Malkandueva A.Kh. The concept and requirements for quality wheat grains. *News of the Kabardin-Balkar Scientific Center of RAS*. 2022;6(110):203-216. [in Russian] (Малкандуев Х.А., Шамурзаев Р.И., Малкандуева А.Х. Понятие и требования к качеству зерна пшеницы. *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2022;6(110):203-216). DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-203-216

Mares D.J., Mrva K. Wheat grain preharvest sprouting and late maturity alpha-amylase. *Planta*. 2014;240(6):1167-1178. DOI: 10.1007/s00425-014-2172-5

Newberry M., Zwart A.B., Whan A., Mieog J.C., Sun M., Leyne E. et al. Does late maturity alpha-amylase impact wheat baking quality? *Frontiers in Plant Science*. 2018;9:1356. DOI: 10.3389/fpls.2018.01356

Payne P.I., Nightingale M.A., Krattiger A.F., Holt L.M. The relationship between HMW glutenin subunit composition and bread-making quality of British-grown wheat varieties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 1987;40(1):51-65. DOI: 10.1002/jsfa.2740400108

Pumpyansky A.Ya. Technological properties of bread wheats (Tekhnologicheskiye svoystva myagkikh pshenits). Leningrad: Kolos; 1971. [in Russian] (Пумпянский А.Я. Технологические свойства мягких пшениц. Ленинград: Колос; 1971).

Shewry P.R., Halford N.G. Cereal seed storage proteins: structures, properties and role in grain utilization. *Journal of Experimental Botany*. 2002;53(370):947-958. DOI: 10.1093/jexbot/53.370.947

Vasilenko I.I., Komarov V.I. (comp.). Grain quality assessment: a reference book. Moscow: Agropromizdat; 1987. [in Russian] (Оценка качества зерна: справочник / сост. И.И. Василенко, В.И. Комаров. Москва: Агропромиздат; 1987).

Zhuchenko A.A. Ecological genetics of cultivated plants as an independent scientific discipline. Theory and practice (Ekologicheskaya genetika kulturnykh rasteniy kak samostoyatelnaya distsiplina. Teoriya i praktika). Krasnodar: Prosveshchenie-Yug; 2010. [in Russian] (Жученко А.А. Экологическая генетика культурных растений как самостоятельная научная дисциплина. Теория и практика. Краснодар: Просвещение-Юг; 2010).

Информация об авторах

Мария Викторовна Соловьева, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, maria.soloveva.97@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6904-4488

Илья Анатольевич Кибкало, кандидат сельскохозяйственных 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, i.kibkalo@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-8870-121X

Борис Васильевич Зырянов, младший научный сотрудник, Омский аграрный научный центр, 644012 Россия, Омск, пр. Королева, 26, boriska_zyryanov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-9268-4076

Игорь Александрович Белан, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией, Омский аграрный научный центр, 644012 Россия, Омск, пр. Королева, 26, belan_skg@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8911-4199

Наталья Сергеевна Обухова, ведущий специалист, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, natali0925@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1479-5997

Евгений Валерьевич Зуев, кандидат сельскохозяйственных 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.zuev@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0001-9259-4384

Information about the authors

Maria V. Solovieva, Associate Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, maria.soloveva.97@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6904-4488

Iliya A. Kibkalo, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, i.kibkalo@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-8870-121X

Boris V. Zyryanov, Associate Researcher, Omsk Agricultural Scientific Center, 26 Koroleva Ave., Omsk, 644012, Russia, boriska_zyryanov@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-9268-4076

Igor A. Belan, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Head of a Laboratory, Omsk Agricultural Scientific Center, 26 Koroleva Ave., Omsk 644012, Russia, belan_skg@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8911-4199

Natalia S. Obukhova, Leading Specialist, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, natali0925@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1479-5997

Evgeny V. Zuev, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, e.zuev@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0001-9259-4384

Вклад авторов: Соловьева М. В., Кибкало И. А., Зуев Е. В. – концепт; аналитика; написание и редактирование статьи. Соловьева М. В., Кибкало И. А., Обухова Н. С. – технологическая оценка; математическая обработка данных. Зырянов Б. В., Белан И. А. – получение растительного материала; предоставление метеоданных.
Contribution of the authors: Solovieva M. V., Kibkalo I. A., Zuev E. V. – concept; analysis; writing and editing of the article. Solovieva M. V., Kibkalo I. A., Obukhova N. S. – technological assessment; mathematical data processing. Zyryanov B. V., Belan I. A. – obtaining plant material; providing meteorological data.

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

Статья поступила в редакцию 04.09.2025; одобрена после рецензирования 09.10.2025; принята к публикации 30.10.2025.
The article was submitted on 04.09.2025; approved after reviewing on 09.10.2025; accepted for publication on 30.10.2025.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 632.112:633.854.78
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o20

CC BY

Изменение элементного состава растений подсолнечника при воздействии засухи и тяжелых металлов

Д. Г. Федорова, Н. М. Назарова, Б. С. Укенов

Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Дарья Геннадьевна Федорова, DaryaOrlova24@rambler.ru

Актуальность. Исследование имеет особое значение ввиду усиливающихся темпов мировой аридизации климата, негативно влияющей в совокупности с антропогенным воздействием на сельское хозяйство. Статья посвящена исследованию изменения элементного состава растений подсолнечника ‘Посейдон 625’ на фоне вариабельности фотосинтетической системы при воздействии комбинированного стресса (влияние тяжелых металлов и засухи).
Материалы и методы. Эксперимент проводили над группой контрольных образцов, выращенных при влиянии только засушливых условий, и двумя экспериментальными группами, подвергаемых дополнительному воздействию тяжелых металлов: кадмий (Cd) (концентрации: 0,384 мг/кг, 0,768 мг/кг, 1,536 мг/кг) и свинец (Pb) (концентрации: 13,04 мг/кг, 26,08 мг/кг, 52,16 мг/кг). Анализ элементного состава опытных и контрольных образцов осуществляли методом оптико-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) с использованием Agilent 7900 ICP-MS (Agilent Technologies, США).
Результаты. Сформирована база данных содержания 24 элементов в растении подсолнечника (корень, побег, семя) и в почве. Установлено значимое увеличение поглощения P, K, Ca, Mg, Fe и B растениями подсолнечника при воздействии комбинированного стресса. Отмечено значительное увеличение (в 4 раза) содержания кадмия в конечной продукции. Однако, несмотря на повышение содержания свинца в корнях и побегах подсолнечника, в его семенах превышений контрольных показателей выявлено не было.
Заключение. Установлено отрицательное действие Cd и Pb на растения подсолнечника, которое проявляется в негативном изменении элементного состава биомассы и семенного материала.

Ключевые слова: *Helianthus annuus* L. ‘Посейдон 625’, засуха, кадмий, свинец, коэффициент транслокации, коэффициент биологического поглощения

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-10060 (https://rscf.ru/project/23-76-10060/).

Для цитирования: Федорова Д.Г., Назарова Н.М., Укенов Б.С. Изменение элементного состава растений подсолнечника при воздействии засухи и тяжелых металлов. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(1):49-61. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o20

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

© Федорова Д. Г., Назарова Н.М., Укенов Б.С., 2026

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o20

Changes in the element composition of sunflower plants under the effect of drought and heavy metals

Darya G. Fedorova, Natalia M. Nazarova, Bulat S. Ukenov

Orenburg State University, Orenburg, Russia

Corresponding author: Darya G. Fedorova, DaryaOrlova24@rambler.ru

Background. The study is of particular importance due to the increasing pace of global climate aridification, which negatively affects agriculture in combination with anthropogenic impact. This is a case study of changes in the element composition of 'Poseidon 625' sunflower plants in the context of their photosynthetic system variability under the effect of combined stressors (heavy metals, and drought).
Materials and methods. The experiment involved a set of control samples grown under the impact of arid conditions only, and two experimental groups additionally exposed to heavy metals: Cd (conc. 0.384 mg/kg, 0.768 mg/kg, and 1.536 mg/kg) and Pb (conc. 13.04 mg/kg, 26.08 mg/kg, and 52.16 mg/kg). Experimental and control samples were analyzed for the studied element composition by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-MS) using Agilent 7900 ICP-MS (Agilent Technologies, USA).
Results. A database was created for the content of 24 elements in a sunflower plant (root, shoot and seed) and soil. A significant increase in the absorption of P, K, Ca, Mg, Fe and B by sunflower plants was recorded under the combination of both stressors. A significant increase (4 times) in the cadmium content was observed in the final product. However, despite a significant increase in the lead content in sunflower roots and shoots, no excess over the control values was detected in the seeds.
Conclusion. Cd and Pb were found to have negative effects on sunflower plants, which manifested itself in a negative change in the element composition of biomass and seed material.

Keywords: *Helianthus annuus* L. 'Poseidon 625', drought, cadmium, lead, translocation coefficient, biological absorption coefficient.

Acknowledgments: the study was funded by the Russian Science Foundation, Grant No. 23-76-10060 (https://rscf.ru/project/23-76-10060/).

For citation: Fedorova D.G., Nazarova N.M., Ukenov B.S. Changes in the element composition of sunflower plants under the effect of drought and heavy metals. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(1):49-61. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o20

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Загрязнение почв потенциально токсичными элементами в настоящее время представляет серьезную экологическую угрозу и является одной из наиболее актуальных глобальных экологических проблем (Xu et al., 2019; Yan et al., 2021). Особую тревогу вызывает накопление тяжелых металлов (ТМ) в различных средах, в частности в почве и растениях как главных депонирующих компонентах антропогенно преобразованных экосистем (Keshavarzi, Kumar, 2020; Ding et al., 2022; Shaheen et al., 2023).

Загрязнение почв кадмием (Cd) и свинцом (Pb) представляет собой глобальную проблему для продовольственной безопасности из-за их широкого распространения, токсичности при низких концентрациях, стойкости и биоаккумуляции в живых организмах (Akbar et al., 2024).

Подсолнечник – однолетнее растение семейства астровых (Asteraceae), которое является основной масличной культурой в нашей стране и широко культивируется на Северном Кавказе, в Поволжье и областях Центрально-Черноземного экономического района. Среди различных сельскохозяйственных культур именно у подсолнечника определяется самое высокое поглощение кадмия в биомассе побегов (Benavides et al., 2021). Кроме этого, сорта/гибриды подсолнечника имеют различные механизмы накопления Cd, что позволяет отдельным генотипам обладать лучшей переносимостью его токсического воздействия (Fu et al., 2022). Отмечено, что загрязнение почвы свинцом снижает рост растений подсолнечника и оказывает негативное влияние на физиологические процессы и урожайность на всех уровнях свинцового стресса (Zehra et al., 2020).

Кадмий и засуха являются наиболее разрушительными из абиотических стрессов с негативными последствиями в виде нарушения метаболизма, ограничения эффективности использования питательных веществ и нарушения фотосинтеза растений. Стресс от засухи дополнительно усиливает окислительный стресс, снижая активность антиоксидантных ферментов (Adrees et al., 2020). Подобные исследования, направленные на установление зависимости степени накопления тяжелых металлов (ТМ) в условиях засухи, проводились на некоторых сельскохозяйственных культурах (Ahmed et al., 2021). Однако сведений о влиянии засухи на аккумуляцию свинца сельскохозяйственными культурами практически нет.

В литературе также отсутствуют сведения о полевых исследованиях влияния засухи на степень аккумуляции ТМ сельскохозяйственными культурами. Ряд авторов при исследовании вопроса о снижении концентраций ТМ в растениях при засухе сходятся во мнении о необходимости проведения полевых исследований (Khan et al., 2022).

Известно, что масло подсолнечника является источником макроэлементов, таких как натрий (Na), калий (K), кальций (Ca), магний (Mg), фосфор (P), и микроэлементов, таких как железо (Fe), селен (Se), марганец (Mn), хром (Cr), цинк (Zn), алюминий (Al), барий (Ba), стронций (Sr), олово (Sn), медь (Cu), кобальт (Co) и таллий (Ti), которые необходимы или токсичны для здоровья человека при употреблении в больших количествах (Melo et al., 2019; Martinec et al., 2019). Кроме того, в пищевых растительных маслах содержатся некоторые химические элементы, такие как мышьяк (As), кадмий (Cd), никель (Ni), свинец (Pb), ртуть (Hg) и медь, которые токсичны (Astolfi et al., 2021; Farzin, Moassesi, 2014) и канцерогенны для потребителей даже в малых количествах. Более того, наличие Ca, Co, Mg, Fe, Zn, Cu, Mn, Sn и Ni ускоряет окисление растительных масел, влияя на их вкус, свежесть, срок хранения и токсичность (Astolfi et al., 2021). Данные об изменении элементного состава растений и конечной продукции подсолнечника под воздействием стресса от токсичных металлов и аридизации климата в литературе отсутствуют. Однако, учитывая актуальность данного вопроса, авторами была поставлена *цель* – оценить изменчивость элементного состава растений и семян подсолнечника при воздействии комбинированного стресса от засухи и тяжелых металлов (кадмий и свинец). В ходе проводимого исследования изменения элементного состава сопоставлялись с варьированием концентрации фотопигментов, водного баланса и содержания белка в растениях подсолнечника.

Материалы и методы

По природно-климатическим условиям Оренбургская область относится к зоне сухих степей. Почвы опытного участка представлены черноземом обыкновенным среднегумусным среднемощным тяжелосуглинистым. Влагообеспеченность почвы пониженная (менее 20%).

Исследования проводились в период вегетации 2025 г. Погодные условия характеризовались максимальной нестабильностью (табл. 1). Гидротермический коэффициент за период с апреля по сентябрь при сумме активных температур 3521,4°С в среднем равен 0,6, что определяет погодные условия, характерные для зон сухого земледелия.

Таблица 1. Климатические параметры в период проведения исследования

Table 1. Climate parameters during the period of the experiment

Месяц	Сумма эффективных температур, °С	Осадки, мм	ГТК
Апрель	293,5	21,2	0,7
Май	919,6	28,5	0,5
Июнь	1527,4	60,7	0,9
Июль	2205,8	30,5	0,4
Август	2860,6	43,4	0,7
Сентябрь	3521,4	14,3	0,2

Объектом исследования являлся сорт *Helianthus annuus* L. 'Посейдон 625'. Исследования проводили на опытном участке и в лаборатории экспериментальной ботаники ботанического сада Оренбургского государственного университета.

Посев производили в вегетационные сосуды (с предварительно восстановленным почвенным горизонтом и дренажем) вручную, с заделкой семян на глубину не более 5 см. Норма высева – 80 тыс./га с переводом значения на экспериментальный вегетационный сосуд (150 × 180 см) (около 10–12 растений в 1 сосуде).

Заложены варианты опыта в трехкратной повторности:

– контроль (посев семян в грунт без внесения токсичных металлов);

– экспериментальные группы с Cd (концентрации: 0,384 мг/кг, 0,768 мг/кг, 1,536 мг/кг);

– экспериментальные группы с Pb (концентрации: 13,04 мг/кг, 26,08 мг/кг, 52,16 мг/кг).

Вегетационные сосуды (V = 150 л) помещали вглубь почвы на уровень горизонта. Соли ацетатов металлов (Me) вводили осенью предшествующего посеву года для обеспечения равномерного их распределения.

Анализ опытных и контрольных образцов на исследуемый элементный состав осуществляли методом оптико-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) с использованием Agilent 7900 ICP-MS (Agilent Technologies, США). Лабораторные исследования проводили на базе Федерального научного центра биологических систем и агротехнологий РАН (ФНЦ БСТ РАН, г. Оренбург). Сбор биоматериала (побеги и корни) осуществлялся троекратно с 5 растений за сезон вегетации подсолнечника на 30-е, 60-е и 90-е сутки развития растений. Пробы семян (250 г) отбирали при достижении их полной спелости. Биоматериал герметично упаковывали и доставляли в лабораторию экспериментальной ботаники ботанического сада, где подвергали высушиванию до постоянной массы в термостате (ТВ-80, Россия), после чего транспортировали в лабораторию ФНЦ БСТ РАН.

Коэффициент транслокации (КТ) Me рассчитывали как отношение содержания элемента в надземной части растения к его содержанию в корне, что отражает эффективность транспорта элемента в системе «корень – побег». Для оценки эффективности поглощения микроэлементов использован коэффициент биологического поглощения (КБП), представляющий собой частное от деления содержания элемента в золе растительного материала на его содержание в корнеобитаемом слое почвы (Macnair, 2003).

Влажность семян определяли стандартной методикой по ГОСТ 10856-96 (GOST 10856-96…, 2010).

Выделение и расчет содержания пигментов фотосинтеза (хлорофилл *a* и *b*, каротиноиды) осуществляли на ацетоновых экстрактах биоматериала по стандартной методике А. А. Шлыка (Shlyk, 1968).

Математическая обработка полученных данных, основанная на определении значимости отличий экспериментальных групп от контроля, степени корреляционной зависимости между исследуемыми параметрами (по Пирсону, Спирмену), проведена с использованием ПО Statistica 10.0 на уровне значимости 90–95%.

Результаты и обсуждение

Отмечена нестабильность накопления фосфора (P) подсолнечником по ходу вегетации, что связано как с фактором воздействия стресса, так и с особенностями онтогенеза культуры. Максимальное содержание P, как в побеге, так и в корне, отмечается на первых стадиях развития растений (до возраста 30 суток), что объясняется высокой потребностью в фосфоре как стимуляторе ростовых процессов (рис. 1).

Средние значения концентрации P за период вегетации подсолнечника показывают противоположную направленность в надземной биомассе под воздействием разных металлов на фоне незначительных отличий содержания в корнях (табл. 2). При повышении Cd в субстрате содержание P в зеленой биомассе растений увеличивается; увеличение Pb снижает его содержание в побе-

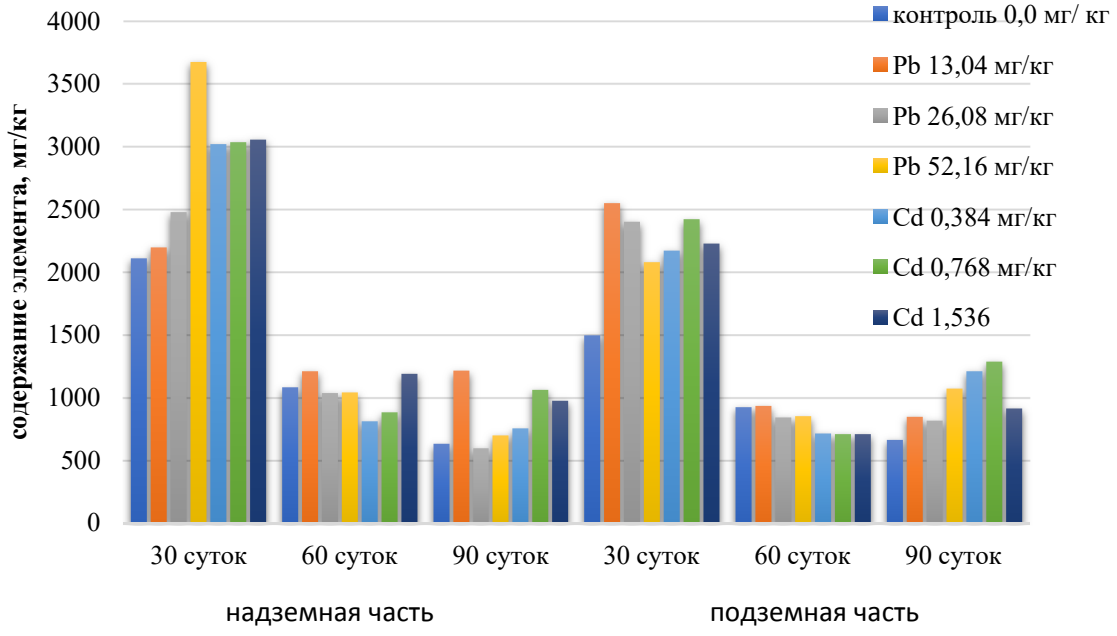


Рис. 1. Варьирование содержания фосфора в растениях подсолнечника по фазам вегетации

Fig. 1. Variation of phosphorus content in sunflower plants across the phases of plant development

Таблица 2. **Референтные значения элементного состава надземной биомассы подсолнечника**
Table 2. **Reference values of the element composition in the aboveground sunflower biomass**

Элемент	Вариант опыта						
	0,0 мг/кг	Cd 0,384 мг/кг	Cd 0,768 мг/кг	Cd 1,536 мг/кг	Pb 13,04 мг/кг	Pb 26,08 мг/кг	Pb 52,16 мг/кг
	Концентрация элемента в биомассе, мг/кг						
Cd	0,02 ± 0,001	0,0 8± 0,002	0,16 ± 0,051	0,26 ± 0,031	–	–	–
Pb	0,04 ± 0,005	–	–	–	0,18 ± 0,051	0,21 ± 0,033	0,31 ± 0,012
P	1275± 130,3	1530 ± 210,1	1662 ± 64,5	1743 ± 93,1	1543 ± 130,3	1373 ± 101,1	1306 ± 119,2
K	31238 ± 350,3	36158 ± 410,3	34790 ± 630,3	36853 ± 452,1	36092 ± 450,3	40206 ± 715,4	32815 ± 501,1
Ca	11931 ± 210,1	13748 ± 131,1	14237 ± 225,4	12626 ± 301,3	12407 ± 190,3	12735 ± 219,1	13785 ± 165,1
Mg	2531 ± 35,1	4002 ± 93,3	3428 ± 65,4	3501 ± 64,1	3556 ± 65,3	3401 ± 55,3	3902 ± 130,2
Na	606 ± 22,2	849 ± 65,2	899 ± 66,4	682 ± 58,4	715 ± 48,1	708 ± 74,5	857 ± 75,4
Al	613 ± 36,0	1198 ± 101,1	1412 ± ±99,0	707 ± 83,3	7001 ± 65,4	744 ± 74,4	1303 ± 101,2
Mn	71 ± 11,1	72 ± 13,3	87 ± 19,1	67 ± 9,2	68 ± 13,3	68 ± 7,1	75 ± 10,1
Co	0,5 ± 0,01	0,7 ± 0,05	0,9 ± 0,09	0,5 ± 0,03	0,5 ± 0,03	0,5 ± 0,05	0,7 ± 0,05
Ni	5,3 ± 0,52	6,1 ± 0,94	6,1 ± 1,01	5,3 ± 0,62	5,0 ± 0,93	5,3 ± 0,51	6,1 ± 0,73
Cu	5,4 ± 0,96	5,0 ± 1,17	5,5 ± 1,11	4,8 ± 0,73	5,0 ± 0,83	5,2 ± 0,83	5,3 ± 1,13
Se	0,1 ± 0,01	0,3 ± 0,03	0,4 ± 0,03	0,3 ± 0,07	0,4 ± 0,06	0,2 ± 0,03	0,3 ± 0,04
Mo	7,1 ± 1,13	7,6 ± 0,98	7,6 ± 0,92	7,4 ± 1,24	7,6 ± 1,13	7,4 ± 0,95	7,4 ± 1,13
Cr	7,4 ± 1,23	10,0 ± 1,93	8,6 ± 2,12	5,3 ± 0,94	5,3 ± 1,11	7,5 ± 1,33	9,8 ± 2,24
Fe	481 ± 50,4	869 ± 98,2	1113 ± 1,1	530 ± 65,4	513 ± 35,8	532 ± 60,1	964 ± 65,5
Zn	27,8 ± 5,14	34,0 ± 6,11	36,0 ± 7,13	34,0 ± 7,3	34,3 ± 5,74	30,0 ± 9,13	28,2 ± 5,41
B	61,9 ± 6,32	71,1 ± 7,45	74,9 ± 10,12	75,5 ± 12,12	65,1 ± 8,93	63,4 ± 6,34	62,7 ± 7,63
Li	0,7 ± 0,09	1,1 ± 0,33	1,4 ± 0,31	0,8 ± 0,05	0,8 ± 0,05	0,7 ± 0,09	1,2 ± 0,33
Be	0,04	0,03	0,05	0,02	0,07	0,02	0,04
Br	15,3 ± 1,21	23,8 ± 1,13	16,3 ± 2,45	20,7 ± 3,84	20,7 ± 3,33	18,1 ± 2,61	20,6 ± 2,23
Sr	38,6 ± 4,52	44,3 ± 6,44	49,4 ± 6,62	46,1 ± 7,25	42,6 ± 6,41	41,1 ± 3,55	43,9 ± 7,23
I	0,39 ± 0,051	0,56 ± 0,013	0,55 ± 0,044	0,45 ± 0,011	0,47 ± 0,025	0,45 ± 0,022	0,54 ± 0,013
Ba	35,0 ± 3,12	44,1 ± 3,52	58,9 ± 6,36	39,1 ± 5,22	36,0 ± 4,25	33,3 ± 7,51	46,8 ± 6,63

гах. Однако повышение концентрации фосфора при кадмиевом стрессе в сочетании с засухой связано не только с увеличением его поглощения (достоверное увеличение КБП), а также с его накоплением вследствие нарушения аминокислотного баланса и ингибирования биосинтеза белка. Отражается это и в отрицательной корреляционной зависимости содержания фосфора и белка в биомассе подсолнечника, равной 0,9, что проявляется и в снижении запасов белка в семенах растений при избытке ТМ (табл. 3). Однако содержание фосфора в семенах остается на уровне контрольных значений при комбинации засухи и воздействия кадмия, а при минимальных концентрациях свинца даже достоверно (при $p \le 0,05$) превосходят таковые на 13,5% (табл. 4).

Максимальные концентрации калия также отмечены под действием комбинированного стресса (как для Cd, так и Pb) на первом этапе развития подсолнечника. При этом большая часть элемента сконцентрирована в надземной биомассе; коэффициент транслокации варьирует от 1,9 до 2,2 по вариантам исследования. В течение вегетации установлено выравнивание содержания К в побегах и корнях, при значениях коэффициента транслокации от 1,0 до 1,2. На последнем этапе онтогенеза отмечено достоверное нарастание калия в побегах только под воздействием свинца (13,04 мг/кг, 26,08 мг/кг) (рис. 2). Такое повышение содержания калия в период созревания урожая приводит к более эффективному использованию воды, усиливая осморегуляцию. При этом регистри-

Таблица 3. Содержание белка в растениях подсолнечника (динамика в онтогенезе)
Table 3. Protein content in sunflower plants (dynamics in ontogenesis)

Концентрация ТМ в почве, мг/кг	0,0	Cd 0,384	Cd 0,768	Cd 1,536	Pb 13,04	Pb 26,08	Pb 52,16
30 сут.							
Концентрация белка в растении, мг/г	3,4	0,8	0,4	3,9	1,2	2,1	2,8
60 сут.							
Концентрация белка в растении, мг/г	41,9	22,9	25,1	19,8	23,2	16,6	16,7
90 сут.							
Концентрация белка в растении, мг/г	4,1	3,2	4,4	7,4	5,9	5,7	7,9
Содержание белка в семенах, мг/кг	20,0	19,4	19,6	13,7	14,8	14,9	16,3

Таблица 4. Референтные значения элементного состава семян подсолнечника
Table 4. Reference values of the element composition in sunflower seeds

Элемент	Вариант опыта						
	0,0 мг/кг	Cd 0,384 мг/кг	Cd 0,768 мг/кг	Cd 1,536 мг/кг	Pb 13,04 мг/кг	Pb 26,08 мг/кг	Pb 52,16 мг/кг
	Концентрация элемента в семенах, мг/кг						
Cd	0,013 ± 0,0092	0,03 ± 0,001	0,042 ±0,0001	0,045 ± 0,0013	–	–	–
Pb	0,012 ± 0,0001	–	–	–	0,011 ±0,0021	0,01 ± 0,0002	0,01 ± 0,001
P	2907 ± 148,3	2948 ± 125,4	3044 ± 121,4	2828 ± 116,1	3295 ± 156,5	3124 ± 165,4	2741 ± 144,3
K	7519 ± 374,3	6680 ± 281,1	6638 ± 325,4	7254 ± 348,1	6198 ± 279,3	6877 ± 413,3	7196 ± 309,1
Ca	1088 ± 57,4	935 ± 37,3	988 ± 32,3	1075 ± 49,1	1059 ± 46,2	1008 ± 45,4	1021 ± 41,2
Mg	1260 ± 43,3	1235 ± 43,4	1373 ± 66,1	1324 ± 65,4	1392 ± 50,2	1331 ± 43,3	1355 ± 42,1
Na	24 ± 2,0	49 ± 4,0	45 ± 3,0	50 ± 2,1	44 ± 3,3	45 ± 2,5	47 ± 3,0
Al	14,0 ± 1,91	21,0 ± 1,33	26,4 ± 1,45	23,1 ± 1,22	19,5 ± 0,82	18,2 ± 0,91	22,7 ± 0,71
Mn	11,9 ± 0,62	11,4 ± 0,55	10,7 ± 0,44	10,4 ± 0,56	11,6 ± 0,51	9,5 ± 0,53	11,2 ± 0,60
Co	0,086 ± 0,0044	0,06 ± 0,005	0,07 ± 0,005	0,08 ± 0,005	0,08 ± 0,003	0,08 ± 0,004	0,07± 0,004
Ni	3,01 ± 0,114	3 ± 0,1	3,2 ± 0,17	3,3 ± 0,09	2,9 ± 0,11	2,7 ± 0,22	2,9 ± 0,13
Cu	4,4 ± 0,23	3,6 ± 0,17	4,7 ± 0,21	4,4 ± 0,26	4,0 ± 0,24	3,7 ± 0,22	4,5 ± 0,22
Se	0,02 ± 0,005	0,04 ± 0,023	0,07 ± 0,005	0,08 ± 0,008	0,04 ± 0,004	0,05 ± 0,004	0,04 ± 0,003
Mo	6,9 ± 0,63	6,29 ± 0,325	6,9 ± 0,33	6,71 ± 0,71	6,5 ± 0,33	6,8 ± 0,31	7,0± 0,73
Cr	1,3 ± 0,041	1,1 ± 0,082	1,6 ± 0,07	2,3 ± 0,07	1,0 ± 0,05	0,7 ± 0,06	0,2 ± 0,06
Fe	30,0 ± 1,24	33,0± 1,42	43,6 ± 1,82	40,3 ± 1,71	31,6 ± 1,61	26,9 ± 0,92	36,8 ± 1,61
Zn	35,5 ± 1,2	38,9 ± 1,4	39,3 ± 1,25	35,4 ± 1,22	39,5 ± 1,71	35,6 ± 1,53	38,1 ± 1,11
B	13,3 ± 2,03	31,0 ± 2,76	34,4 ± 1,53	37,4 ± 1,72	36,8 ± 1,55	38,4 ± 1,81	40,6 ± 1,73
Li	0,01 ± 0,005	0,017 ± 0,0062	0,023 ± 0,0034	0,021 ± 0,0062	0,019 ± 0,0042	0,034 ± 0,0033	0,019 ± 0,0011
Be	0,0005	0,0005	0,0005	0,001	0,000	0,001	0,001
Br	2,3 ± 0,11	2,2 ± 0,15	2,2 ± 0,07	2,3 ± 0,21	1,7 ± 0,055	1,7 ± 0,053	1,8 ± 0,07
Sr	1,9 ± 0,09	1,7± 0,07	2,2 ± 0,11	1,8 ± 0,13	1,9 ± 0,09	1,9 ± 0,14	1,9 ± 0,11
I	0,1 ± 0,01	0,01 ± 0,004	0,09 ± 0,007	0,11 ± 0,011	0,12 ± 0,005	0,12 ± 0,013	0,11 ± 0,014
Ba	2,5 ± 0,13	2,0 ± 0,08	2,8 ± 0,16	2,5 ± 0,08	2,3 ± 0,14	2,2 ± 0,14	2,5 ± 0,13

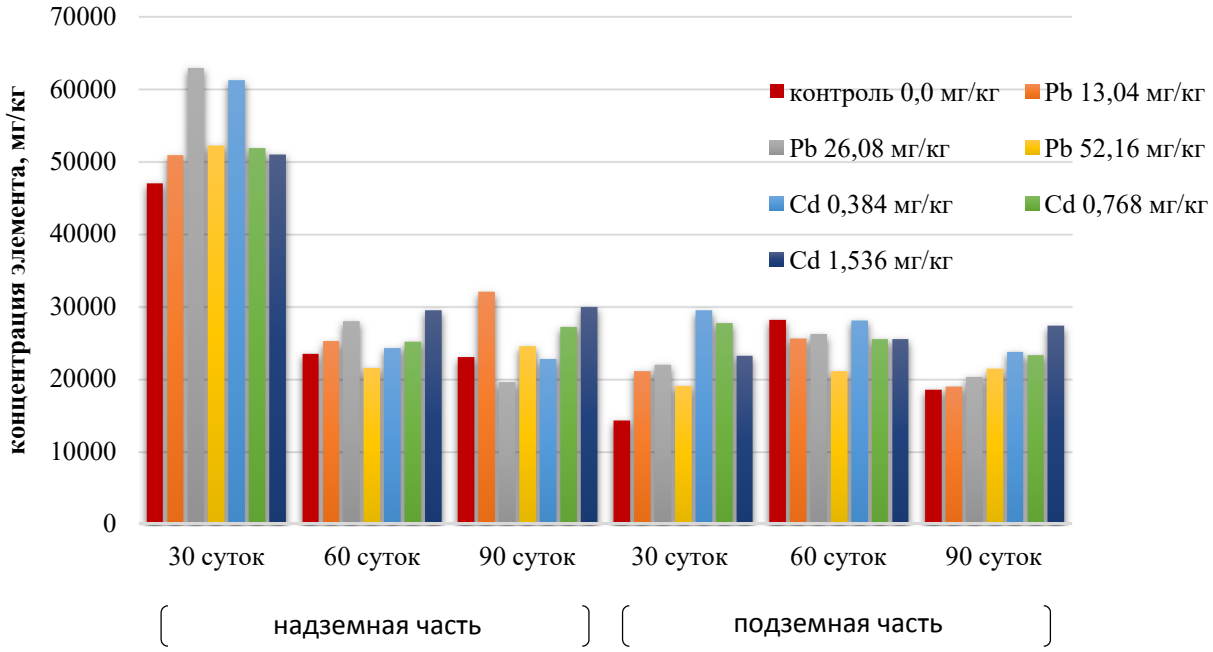


Рис. 2. Варьирование содержания калия в биомассе растений подсолнечника
Fig. 2. Variation of potassium content in the biomass of sunflower plants

руется повышение фотосинтетических пигментов, что впоследствии может повлиять на увеличение урожайности и качество зерна.

Средние значения содержания К в растениях подсолнечника показывают его увеличение в сравнении с контролем в биомассе на фоне повышенного содержания кадмия в почве. При этом числовые значения при всех исследуемых концентрациях показывают однородность (от 34 тыс. до 36 тыс. мг/кг). При комбинации свинца с засухой в концентрациях 13,04 и 26,08 мг/кг отмечено превышение средних показателей калия относительно контроля до 30%, а при максимальной концентрации Pb значения выравниваются с контрольными показателями (31–32 тыс. мг/кг) (см. табл. 3). Значительное превышение концентрации К в корнях отмечено при кадмиевом стрессе, и здесь же менее выражено снижение показателей данного элемента (табл. 5). При воздействии свинца содержание калия опускается до контрольных значений при его максимальной концентрации в субстрате. Таким образом, увеличивая запасы калия, растения подсолнечника повышают толерантность к стрессовым факторам, комплексно воздействующим на них, что позволяет им полностью завершить цикл развития.

На фоне повышенного содержания калия в биомассе отмечено его снижение в конечной продукции (см. табл. 4), что в итоге отражается на понижении влажности семян (рис. 3). Наибольшее снижение К отмечено на минимальной исследуемой концентрации свинца и равно 17,6%. Однако при увеличении концентрации стрессора отмечается хоть и незначимое, но повышение содержания калия, что имеет прямую связь (r = 0,77) с увеличением влажности семенного материала. Таким образом, растения подсолнечника, увеличивая запасы калия в биомассе как основного осморегулятора, пытаются противостоять стрессу от засухи, усиленному воздействием токсичных металлов.

В отличие от макроэлементов основное изменение микроэлементного состава у исследуемых растений подсолнечника отмечено в корневой системе. Однако в динамике содержания цинка отмечается обратная тенденция. Так, при влиянии на растения засухи и ее одновременного сочетания с кадмием цинк в большей степени запасается в надземной части, и только ближе к окончанию онтогенеза отмечается его концентрирование в корневой системе (рис. 4). При этом КТ с 0,8 возрастает до 1,1 (табл. 6). При комбинации свинца с засухой уже в начале генеративного развития подсолнечника отмечается основное накопление цинка в корневой системе. Здесь же прослеживается прямая достоверная взаимосвязь с концентрацией Pb в биомассе корней (r = 0,79). Стоит отметить, что интенсивность поглощения цинка различна при сочетании с исследуемыми металлами: Cd при повышении концентрации увеличивает поглощение элемента, изменяя КБП от 52,3 до 63,5 при значении в контроле 50,3; в противоположность ему, Pb значительно снижает КБП Zn до 46 в максимальной концентрации (табл. 7), что говорит о большей биодоступности элемента в почве и меньшем его поглощении растениями данной экспериментальной группы.

Никель – микроэлемент, необходимый растениям для нормального роста, – показывает превышение над контрольными показателями в надземной биомассе при концентрации кадмия в среде 0,384 и 0,768 мг/кг, а также в максимальной концентрации свинца на 12,6% (см. табл. 3). В корневой системе экспериментальных растений отмечается снижение концентрации никеля по отношению к сравниваемым показателям. При этом под воздействием Pb разницы по его концентрациям не отмечается, а вот нарастание кадмиевого стресса стремительно усиливает накопление никеля в подземной биомассе (от 26,5 мг/кг до 34,6 мг/кг) (см. табл. 5).

Выявлено увеличение содержания бора и селена в надземной биомассе – микроэлементов, играющих значимую роль в повышении устойчивости растений к стрессам (см. табл. 3, 5). Нарастание концентрации бора установлено и в корневой системе у всех экспериментальных образцов, однако данное увеличение не является значимым. Превышение контроля в пределах 15–22%

Таблица 5. **Референтные значения элементного состава корней подсолнечника**
Table 5. **Reference values of the element composition in sunflower roots**

Элемент	Вариант опыта						
	0,0 мг/кг	Cd 0,384 мг/кг	Cd 0,768 мг/кг	Cd 1,536 мг/кг	Pb 13,04 мг/кг	Pb 26,08 мг/кг	Pb 52,16 мг/кг
	Концентрация элементов в корнях, мг/кг						
Cd	0,02 ± 0,012	0,23 ± 0,013	0,43 ± 0,034	0,78 ± 0,021	–	–	–
Pb	0,29±0,013	–	–	–	6,0 ± 0,93	11,6 ± 1,41	24,1 ± 1,54
P	1030 ± 65,3	1368 ± 36,4	1474 ± 48,2	1285 ± 65,4	1445 ± 113,1	1356 ± 99,1	1336 ± 87,3
K	20408 ± 213,1	27153 ± 200,2	25584 ± 153,3	25424 ± 198,2	23959 ± 123,3	22890 ± 243,1	20581 ± 276,4
Ca	4571 ± 124,1	4902 ± 290,0	5532 ± 95,3	5093 ± 115,1	5396 ± 132,3	5001 ± 65,4	5670 ± 117,1
Mg	2171 ± 113,3	2067 ± 267,1	2362± 254,2	2424 ± 197,2	2477 ± 205,1	2228 ± 178,1	2163 ± 169,2
Na	7567 ± 212,2	8304 ± 256,3	9009 ± 302,3	8149 ± 326,3	9352 ± 299,1	9815 ± 264,1	9159 ± 213,3
Al	6194 ± 165,1	4324 ± 315,2	5646 ± 265,1	6638 ± 325,3	6895 ± 323,4	7205 ± 258,2	7554 ± 257,3
Mn	257 ± 35,3	179 ± 22,4	191 ± 47,3	205 ± 33,3	248 ± 25,4	247 ± 17,1	312 ± 65,1
Co	6,0 ± 1,12	4,0 ± 1,22	4,2 ± 0,93	4,7 ± 1,31	5,62± 1,33	5,4 ± 1,52	6,9 ± 2,01
Ni	54,7 ± 11,12	26,5 ± 9,34	30,6 ± 10,11	34,6 ± 12,34	37,5 ± 9,51	33,8 ± 11,23	36,0 ± 12,61
Cu	12,6 ± 2,41	11,6 ± 2,51	17,0 ± 1,91	17,9 ± 2,13	13,1 ± 3,12	13,5 ± 2,62	15,2 ± 2,12
Se	0,6 ± 0,01	0,8 ± 0,02	0,8 ± 0,04	0,9 ± 0,01	0,6 ± 0,02	0,6 ± 0,02	0,7 ± 0,07
Mo	7,7 ± 1,71	7,4 ± 1,12	7,9 ± 1,13	7,9 ± 1,61	7,7 ± 0,92	7,7 ± 1,71	7,9 ± 2,12
Cr	84,3 ± 15,11	51,4 ± 13,13	66,2 ± 9,91	78,1 ± 8,32	69,7 ± 6,34	66,7 ± 7,24	84,4 ± 8,13
Fe	8048 ± 115,1	8014 ± 123,1	7252 ± 213,3	9892 ± 356,4	5101 ± 227,3	5636 ± 299,1	7257 ± 450,1
Zn	31,6 ± 8,93	31,2 ± 6,31	32,9 ± 6,54	31,9 ± 6,68	34,0 ± 8,35	32,9 ± 3,13	37,6 ± 4,83
B	28,8 ± 7,72	33,9 ± 6,73	35,5 ± 5,62	34,9 ± 6,60	30,5 ± 7,10	33,0 ± 5,12	32,5 ± 3,17
Li	5,1 ± 1,03	3,5 ± 1,23	4,2 ± 0,91	4,6 ± 1,13	5,3 ± 1,23	5,1 ± 1,34	6,8 ± 1,61
Be	0,36 ± 0,022	0,26 ± 0,052	0,29 ± 0,042	0,33 ± 0,031	0,37 ± 0,025	0,37 ± 0,034	0,46 ± 0,051
Br	14,0 ± 3,50	16,8 ± 3,62	17,3 ± 1,53	17,3 ± 2,48	18,2 ± 2,34	18,3 ± 4,55	14,9 ± 3,25
Sr	40,7 ± 12,34	42,8 ± 10,31	49,7 ± 8,91	45,4 ± 7,91	49,2 ± 11,22	44,8 ± 13,13	49,9 ± 12,11
I	1,67 ± 0,553	1,29 ± 0,601	1,19 ± 0,606	1,40 ± 0,354	2,00 ± 0,1105	1,92 ± 0,535	1,58 ± 0,432
Ba	173,3 ± 33,03	173,3 ± 35,01	177,5 ± 32,33	180,5 ± 45,13	195,0 ± 35,45	186,5 ± 25,4	207,3 ± 45,17

по содержанию элемента в побегах установлено при воздействии избытка Cd. В этой же экспериментальной группе наибольшее нарастание концентрации бора в биомассе установлено в конце вегетации, что, вероятнее всего, связано с физиологическим старением и усилением состояния перенапряжения растительного организма. Под негативным воздействием свинца значения содержания бора в биомассе не показывают значимых отличий от контрольных показателей.

Известно, что селен (Se) способен повысить устойчивость растений к неблагоприятным факторам окружающей среды за счет активизации антиоксидантной системы, стимулирования фотосинтетического потенциала, накопления белков и моносахаров, что впоследствии увеличит урожайность культурных растений, а также качество получаемой продукции. Установлено значимое повышение уровня селена в побегах и корнях подсолнечника при повышенном содержании Cd в среде (см. табл. 3, 5). При воздействии повышенных концентраций Pb отмечено увеличение содержания Se в побегах. Максимальное содержание элемента (0,35 мг/кг) наблюдали при концентрации Pb 13,04 мг/кг, что показывает превышение контроля в 2,5 раза. Прямая зависимость (для Cd r = 0,85; для Pb r = 0,88) установлена между накоплением Se в побеге и корнях подсолнечника. В подземной части растений установлено наибольшее превышение (в 1,6 раза) содержания элемента под воздействием максимальной концентрации Cd. При влиянии Pb содержание Se в корнях подсолнечника увеличивается относительно контроля, однако отличия не являются статистически значимыми. В связи с усиленным запасанием элемента в биомассе растений содержание его подвижной формы в почве под воздействием комбинации стрессоров пропорционально снижается, что проявляется

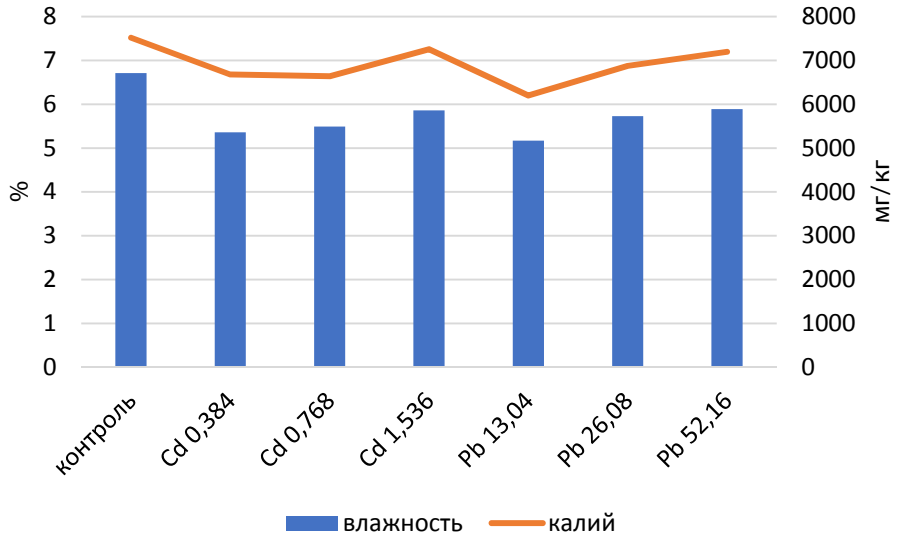


Рис. 3. **Содержание калия и влажность семян подсолнечника**
Fig. 3. **Potassium content and moisture content in sunflower seeds**

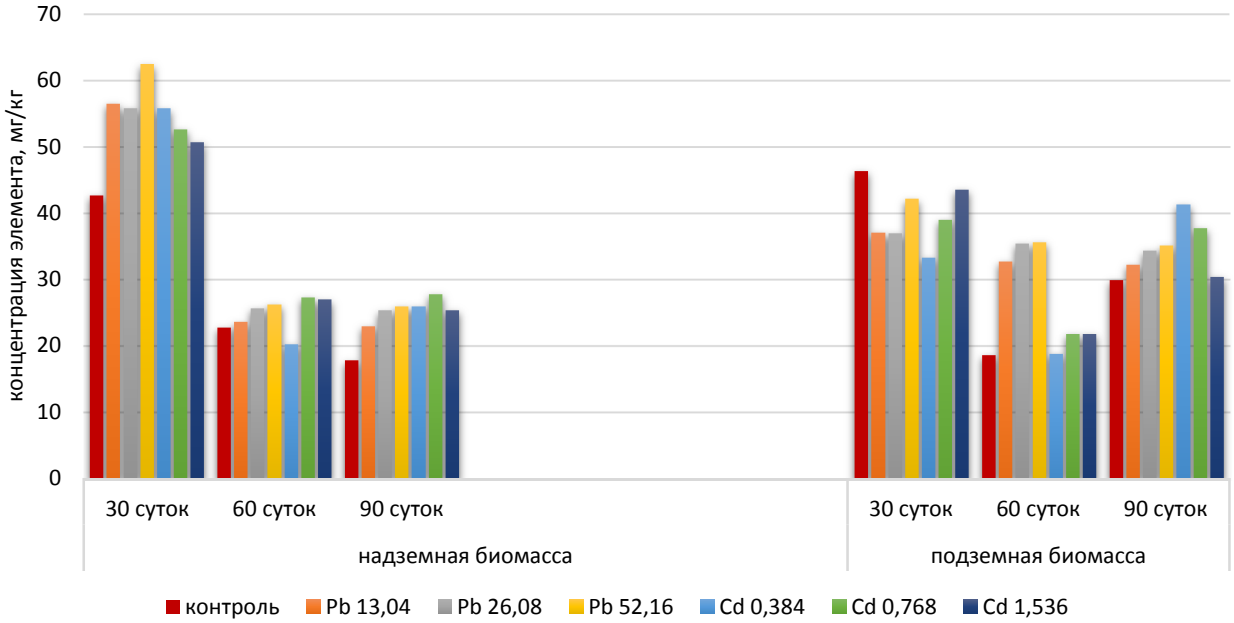


Рис. 4. **Варьирование содержания цинка в биомассе растений подсолнечника**
Fig. 4. **Variation of zinc content in the biomass of sunflower plants**

в значениях коэффициента корреляции (r = –0,81). При этом степень доступности элемента снижается, что отражается на снижении КБП с 0,5 в контроле до 0,09 под влиянием Cd и 0,2 для Pb (см. табл. 7).

Значительное увеличение содержания Se при действии повышенных концентраций Cd в середине вегетационного цикла (рис. 5) положительно коррелирует (r = 0,85–0,89) с накоплением фотосинтетических пигментов (Хл *a*, *b*, Хл *a* + *b*), что может быть связано с повышением фотохимической активности хлоропластов под влиянием элемента (табл. 8). Аналогичная взаимосвязь (r = 0,82) установлена между концентрацией Se в побегах растений и количеством фотосинтетических пигментов (Хл *a*) при токсичном влиянии Pb на заключительных этапах онтогенеза подсолнечника.

Оценка средних значений КТ элементного состава (см. табл. 6) показала, что в целом закономерности распределения элементов в растении (побег/корень) в экспериментальных группах схожи с контролем, за некоторыми исключениями. Так, накопление растениями подсолнечника фосфора при повышении концентрации Pb в почве сдвигается в сторону подземной части на фоне постепенного снижения КТ. Zn в контроле концентрируется в большей степени в корневой системе, а под избыточным влиянием Cd (при всех концентрациях) его накопление превалирует в надземной части (при стабильном КТ, равном 1,1 против 0,8 в контроле).

Рассчитанный КБП (см. табл. 7) показывает значимое (при p ≤ 0,05) увеличение поглощения P, K, Ca, Mg, Fe и B под воздействием ТМ. При этом степень их поглощения увеличивается пропорционально повышению концентрации токсиканта в почве на фоне снижения биодоступности элемента. Максимальное увеличение КБП (в 4,5 раза) Fe отмечено при концентрации Cd 0,768 мг/кг,

Таблица 6. Значения коэффициента транслокации (КТ) при различном уровне стресса

Table 6. Values of the translocation coefficient at different stress levels

Элемент	Вариант опыта						
	0,0 мг/кг	Cd 0,384 мг/кг	Cd 0,768 мг/кг	Cd 1,536 мг/кг	Pb 13,04 мг/кг	Pb 26,08 мг/кг	Pb 52,16 мг/кг
	КТ						
P	1,24	1,12	1,13	1,36	1,1	1	0,98
K	1,53	1,33	1,36	1,45	1,51	1,76	1,59
Ca	2,61	2,8	2,57	2,48	2,3	2,55	2,43
Mg	1,17	1,94	1,45	1,44	1,44	1,53	1,8
Na	0,08	0,1	0,1	0,08	0,08	0,07	0,09
Al	0,1	0,28	0,25	0,11	0,1	0,1	0,17
Mn	0,28	0,4	0,46	0,33	0,27	0,27	0,24
Co	0,08	0,19	0,22	0,11	0,08	0,1	0,1
Ni	0,1	0,23	0,2	0,15	0,13	0,16	0,17
Cu	0,43	0,43	0,32	0,27	0,38	0,38	0,35
Se	0,25	0,41	0,56	0,33	0,56	0,42	0,45
Mo	0,92	1,02	0,96	0,95	0,98	0,96	0,94
Cr	0,09	0,19	0,13	0,07	0,08	0,11	0,12
Fe	0,06	0,11	0,15	0,05	0,1	0,09	0,13
Zn	0,8	1,1	1,1	1,1	1,01	0,91	0,75
B	2,15	2,1	2,11	2,16	2,13	1,92	1,93

Таблица 7. Значения коэффициента биологического поглощения (КБП) для анализируемых элементов при различном уровне металлического стресса

Table 7. Values of the biological absorption coefficient for the analyzed elements at different levels of metal stress

Элемент	Вариант опыта						
	0,0 мг/кг	Cd 0,384 мг/кг	Cd 0,768 мг/кг	Cd 1,536 мг/кг	Pb 13,04 мг/кг	Pb 26,08 мг/кг	Pb 52,16 мг/кг
	КБП						
P	29,66	60,5	72,3	81,8	45,8	60,5	75,5
K	67,9	89,2	88,1	89,6	82	111,9	87,7
Ca	1,77	2,8	2,9	2,4	2,4	2,4	2,7
Mg	3,12	5,42	4,7	4,64	4,39	4,5	5,3
Na	3,5	4,5	4,8	4	3,6	3,5	4,6
Al	20,5	49,1	56	25,9	22,7	25,6	39,7
Mn	1,3	0,8	1,1	0,8	0,7	0,8	1,3
Co	3,6	3,3	3,4	2,8	2,1	2,8	3,9
Ni	9,6	12	12,2	10,6	7,8	8,8	11,4
Cu	51,9	48,5	33,2	30,2	38,6	44,2	46,5
Se	0,7	7,33	7,5	4,8	6,5	5,9	6,1
Cr	41,3	69,7	59,9	31,8	28,1	44,2	54,2
Fe	212,7	653,2	942,8	342,13	335,2	281,3	555,2
Zn	50,6	52,3	63	62,5	56,2	51,7	46
B	34,4	72,6	74,8	75,5	54,3	62,8	62,7

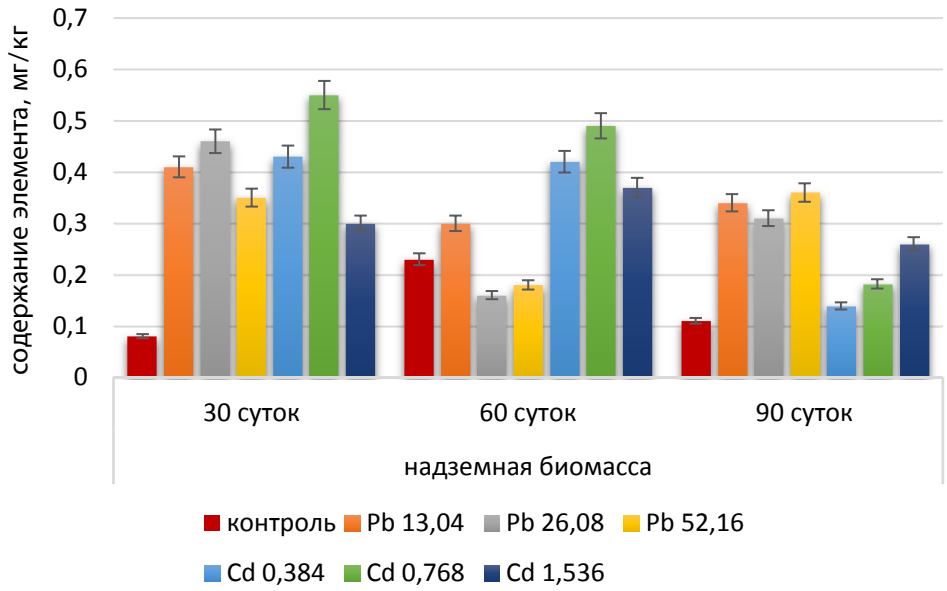


Рис. 5. Динамика накопления селена в надземной части растений подсолнечника
Fig. 5. Dynamics of selenium accumulation in the aboveground sunflower biomass

Таблица 8. Содержание фотосинтетических пигментов в растениях подсолнечника
Table 8. The content of photosynthetic pigments in sunflower plants

	Концентрация ТМ в почве, мг/кг	0,0	Cd 0,384	Cd 0,768	Cd 1,536	Pb 13,04	Pb 26,08	Pb 52,16
Концентрация пигментов, мг/г	**30 сут.**							
	Хл *a*	9,2 ± 1,7	5,6 ± 0,1	3,0 ± 0,5	3,7 ± 0,5	4,6 ± 0,7	3,3 ± 0,7	4,3 ± 0,5
	Хл *b*	3,2 ± 0,5	2,1 ± 0,1	1,1 ± 0,1	1,5 ± 0,6	1,7 ± 0,4	1,2 ± 0,3	1,7 ± 0,3
	Хл *a* + *b*	5,5 ± 0,8	3,3 ± 0,6	1,9 ± 0,3	2,3 ± 0,6	2,9 ± 0,5	2,0 ± 0,2	2,6 ± 0,1
	Кар	0,3 ± 0,09	0,2 ± 0,06	0,1 ± 0,03	0,1 ± 0,05	0,2 ± 0,08	0,1 ± 0,03	0,1 ± 0,02
	60 сут.							
	Хл *a*	11,6 ± 1,5	14,6 ± 2,3	16,6 ± 3,4	10,5 ± 2,0	11,6 ± 1,6	15,5 ± 2,6	11,2 ± 2,3
	Хл *b*	4,5 ± 0,5	5,8 ± 1,1	6,1 ± 1,3	3,6 ± 1,1	4,3 ± 0,9	5,7 ± 1,4	3,5 ± 1,0
	Хл *a* + *b*	7,4 ± 1,0	9,4 ± 2,1	10,2 ± 1,5	6,3 ± 1,7	7,2 ± 1,0	9,6 ± 2,0	6,5 ± 1,6
	Кар	0,4 ± 0,05	0,5 ± 0,06	0,5 ± 0,08	0,4 ± 0,05	0,4 ± 0,04	0,6 ± 0,07	0,4 ± 0,09
	90 сут.							
	Хл *a*	7,2 ± 1,3	13,3 ± 1,9	8,2 ± 2,1	5,5 ± 0,6	8,3 ± 1,3	5,8 ± 0,6	6,9 ± 1,0
	Хл *b*	2,7 ± 0,5	5,0 ± 1,0	2,6 ± 0,5	1,6 ± 0,2	3,0 ± 0,08	1,8 ± 0,2	2,4 ± 0,4
	Хл *a* + *b*	4,4 ± 0,9	8,3 ± 2,1	5,0 ± 0,7	3,2 ± 0,4	5,1 ± 0,6	3,5 ± 0,5	4,2 ± 0,6
	Кар	0,3 ± 0,05	0,5 ± 0,08	0,3 ± 0,05	0,2 ± 0,04	0,3 ± 0,04	0,3 ± 0,08	0,3 ± 0,03

P (в 2,8 раза) и B (в 2,2 раза) – при максимальной концентрации Cd 1,536 мг/кг. Обратная тенденция отмечена для Cu. При воздействии Cd КБП Cu снижается в прямой зависимости от количества ТМ в почве; при свинцовом стрессе наблюдается линейное повышение коэффициента, однако значения остаются ниже контрольных. Самые высокие значения КБП характерны для Fe, что находит прямое отражение в повышении активности фотосинтетических пигментов. Коэффициент корреляции между КПБ Fe и концентрацией Хл *a* + *b* положительный и устанавливается на уровне от 0,72 до 0,95 по вариантам эксперимента. Прямая взаимосвязь установлена и между фотопигментами и биологическим поглощением селена подсолнечником на фоне повышенных концентраций

токсичных металлов: под воздействием кадмия коэффициент корреляции варьирует от 0,83 до 0,88, при воздействии свинца – r = 0,99.

Вследствие высокого осмотического стресса и ионного дисбаланса в конечной продукции (семенах) отмечается высокое содержание натрия Na (превышение контроля в 2 раза) (см. табл. 4), препятствующего поглощению воды, что в итоге негативно отражается на влажности семян.

Se в семенах показывает значимое увеличение, повторяя тенденцию его накопления в побеге и корневой системе. Большее увеличение (в 4 раза) отмечено при воздействии Cd на максимальной исследуемой концентрации, при свинцовом стрессе – в 2,4 раза при концентрации 26,08 мг/кг (см. табл. 4). Так как основная биохимическая функция Se – участие в построении антиоксидантного фермента и защита организма от действия свободных радикалов, по увеличению его концентрации можно констатировать степень повышающейся напряженности растительного организма.

При изучении влияния тяжелых металлов установлен эффект гипераккумуляции Cd в надземной биомассе (КТ в пределах от 1,1 до 2,0 по вариантам опыта) на стадии активного роста (см. табл. 6). Происходит это на фоне усиленного поглощения Cd из почвы при КБП 10,6–11,6 для концентраций 0,384 мг/кг и 0,768 мг/кг. При этом максимальный КБП отмечен в период созревания урожая (от 11,1 до 23,0). Pb в большей степени аккумулируется в корнях подсолнечника, где его концентрация превышает значения содержания его в побеге от 2,5 до 120 раз (см. табл. 3, 5), что в первую очередь свидетельствует о барьерной функции корней, блокирующих поступление и аккумуляцию Pb в надземной биомассе.

Анализ КТ и КПБ показывает избыточное накопление Cd растениями подсолнечника, а большая его подвижность в растительном организме находит прямое отражение в его избыточном накоплении в семенах (см. табл. 4). Превышений концентраций Pb в семенном материале подсолнечника, как и в контроле, не выявлено. В данном случае показатели проявляют однородность и устанавливаются на уровне контрольных (см. табл. 4).

Содержание Cd в семенах достоверно нарастает и уже при минимальной исследуемой концентрации превышает контрольные значения в 2,3 раза, а на максимальной – в 4 раза (см. табл. 4). Установленная закономерность повышения концентрации Cd в семенах подсолнечника на 0,01 мг с каждым последующим увеличением концентрации металла в почве (в 2 раза по сравнению с предыдущей концентрацией) позволяет определить почвенную концентрацию кадмия (для условий места исследования), равную 49,12 мг/кг, при которой содержание кадмия в семенах подсолнечника достигнет установленного ПДК – 0,1 мг/кг.

Выводы

В ходе проведенного исследования установлено отрицательное действие Cd и Pb на растения подсолнечника сорта ‘Посейдон 625’, которое проявляется в негативном изменении элементного состава биомассы и семенного материала.

Установлено значимое увеличение поглощения P, K, Ca, Mg, Fe и B растениями подсолнечника, при этом степень их поглощения увеличивается пропорционально повышению концентрации ТМ в почве. Снижение КБП и повышение доступного содержания элемента в почве отмечено для Cu. Наиболее высокие значения КБП характерны для Fe, что находит прямое отражение в повышении активности фотопигментов. Вследствие высокого осмотического стресса и ионного дисбаланса в семенах отмечается снижение K и высокое содержание Na, что отражается на снижении влажности семян. Se в семенах показывает значимое увеличение, повторяя тенденцию накопления в побеге и корневой системе.

Выявлен эффект гипераккумуляции Cd в побегах подсолнечника в фазе вегетативного роста. Pb в большей степени аккумулируется в подземной части растений, превышая содержание его в побеге от 2,5 до 120 раз. При этом превышений Pb в семенах не выявлено. Содержание Cd в семенах достоверно нарастает и уже при минимальной исследуемой концентрации ТМ превышает контроль в 2,3 раза, а на максимальной – в 4 раза.

Проведенные исследования позволили выявить почвенную концентрацию Cd (для местного климата) в 49,12 мг/кг, при которой содержание данного металла в семенах достигнет установленного предела допустимой концентрации (0,1 мг/кг).

References / Литература

Adrees M., Khan Z.S., Ali S., Hafeez M., Khalid S., Ur Rehman M.Z. et al. Simultaneous mitigation of cadmium and drought stress in wheat by soil application of iron nanoparticles. *Chemosphere*. 2020;238:12468. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.124681

Ahmed T., Noman M., Manzoor N., Shahid M., Abdullah M., Ali L. et al. Nanoparticle-based amelioration of drought stress and cadmium toxicity in rice via triggering the stress responsive genetic mechanisms and nutrient acquisition. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021;209:111829. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.111829

Akbar W.A., Ur Rahim H., Irfan M., Sehrish A.K., Mudassir M. Assessment of heavy metal distribution and bioaccumulation in soil and plants near coal mining areas: implications for environmental pollution and health risks. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2024;196(1):97. DOI: 10.1007/s10661-023-12258-7

Astolfi M.L., Marini F., Frezzini M.A., Massimi L., Capriotti A.L., Montone C.M. et al. Multielement characterization and antioxidant activity of Italian extra-virgin olive oils. *Frontiers in Chemistry*. 2021;9:769620. DOI: 10.3389/fchem.2021.769620

Benavides B.J., Drohan P.J., Spargo J.T., Maximova S.N., Guiltinan M.J. Miller D.A. Cadmium phytoextraction by *Helianthus annuus* (sunflower), *Brassica napus* cv Wichita (rapeseed), and *Chyrsopogon zizanioides* (vetiver). *Chemosphere*. 2021;265:129086. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.129086

Ding C., Chen J., Zhu F., Chai L., Lin Z., Zhang K. Et al. Biological toxicity of heavy metal(loid)s in natural environments: from microbes to humans. *Frontiers in Environmental Science*. 2022;10:920957. DOI: 10.3389/fenvs.2022.920957

Farzin L., Moassesi M.E. Determination of metal contents in edible vegetable oils produced in Iran using microwave-assisted acid digestion. *Quarterly Journal of Applied Chemical Research*. 2014;8(3):35-43.

Fu Y., Zhatova H., Li Y, Liu Q., Trotsenko V., Li C. Physiological and transcriptomic comparison of two sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars with high/low cadmium accumulation. *Frontiers in Plant Science*. 2022;13:854386. DOI: 10.3389/fpls.2022.854386

GOST 10856-96. Interstate standard. Oil seeds. Method for determination of moisture content. Moscow: Standartinform; 2010. [in Russian] (ГОСТ 10856-96. Межгосударственный стандарт. Семена масличные. Метод определения влажности. Москва: Стандартинформ; 2010). URL: https://files.stroyinf.ru/Data/382/38247.pdf [дата обращения: 21.05.2025].

Keshavarzi A., Kumar V. Spatial distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in agricultural soils of Northeastern Iran. *Geology, Ecology, and Landscapes*. 2020;4(2):87-103. DOI: 10.1080/24749508.2019.1587588

Khan Z., Fan X., Khan M.N., Khan M.A., Zhang K., Fu Y. et al. The toxicity of heavy metals and plant signaling facilitated by biochar application: Implications for stress mitigation and crop production. *Chemosphere*. 2022;308(Pt 3):136466. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.136466

Macnair M.R. The hyperaccumulation of metals by plants. *Advances in Botanical Research*. 2003;40:63-105. DOI: 10.1016/S0065-2296(05)40002-6

Martinec N., Balbino S., Dobša J., Šimunić-Mežnarić V., Legen S. Macro- and microelements in pumpkin seed oils: Effect of processing, crop season, and country of origin. *Food Science and Nutrition*. 2019;7(5):1634-1644. DOI: 10.1002/fsn3.995

Melo M., Michel F., Arakaki D., Lima N., Gonçalves D., Cavalheiro L. et al. First study on the oxidative stability and elemental analysis of Babassu (*Attalea speciosa*) edible oil produced in Brazil using a domestic extraction machine. *Molecules*. 2019;24(23):4235. DOI: 10.3390/molecules24234235

Shaheen S.M., Mosa A., Natasha, Jeyasundar P.G.S.A., Hassan N.E.E., Yang X. et al. Pros and cons of biochar to soil potentially toxic element mobilization and phytoavailability: Environmental implications. *Earth Systems and Environment*. 2023;7(1):321-345. DOI: 10.1007/s41748-022-00336-8

Shlyk A.A. On spectrophotometric determination of chlorophylls *a* and *b*. *Biochemistry (Moscow)*. 1968;33(2):275-285. [in Russian] (Шлык А.А. О спектрофотометрическом определении хлорофиллов *a* и *b*. *Биохимия*. 1968;33(2):275-285).

Xu J., Liu C., Hsu P.C., Zhao J., Wu T., Tang J. Et al. Remediation of heavy metal contaminated soil by asymmetrical alternating current electrochemistry. *Nature Communications*. 2019;10(1):2440. DOI: 10.1038/s41467-019-10472-x

Yan Y., Sun Q., Yang J., Zhang X., Guo B. Source attributions of Cadmium contamination in rice grains by Cadmium isotope composition analysis: A field study. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021;210:111865. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.111865

Zehra A., Sahito Z.A., Tong W., Tang L., Hamid Y., Bilal Khan M. et al. Assessment of sunflower germplasm for phytoremediation of lead-polluted soil and production of seed oil and seed meal for human and animal consumption. *Journal of Environmental Sciences (China)*. 2020;87:24-38. DOI: 10.1016/j.jes.2019.05.031

Информация об авторах

Дарья Геннадьевна Федорова, кандидат биологических наук, директор ботанического сада, Оренбургский государственный университет, 460018 Россия, Оренбург, пр. Победы, 13, DaryaOrlova24@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-5323-4965

Наталья Михайловна Назарова, кандидат биологических наук, руководитель научной группы, Оренбургский государственный университет, 460018 Россия, Оренбург, пр. Победы, 13, Nazarova-1989@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-7449-0378

Булат Сирикбаевич Укенов, кандидат биологических наук, доцент, Оренбургский государственный университет, 460018 Россия, Оренбург, пр. Победы, 13, 89198660945@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1407-441X

Information about the authors

Darya G. Fedorova, Cand. Sci. (Biology), Director of the Botanical Garden, Orenburg State University, 13 Pobedy Ave., Orenburg 460018, Russia, DaryaOrlova24@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-5323-4965

Natalia M. Nazarova, Cand. Sci. (Biology), Head of a Scientific Team, Orenburg State University, 13 Pobedy Ave., Orenburg 460018, Russia, Nazarova-1989@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-7449-0378

Bulat S. Ukenov, Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Orenburg State University, 13 Pobedy Ave., Orenburg 460018, Russia, 89198660945@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1407-441X

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 28.07.2025; одобрена после рецензирования 11.11.2025; принята к публикации 09.02.2026.
The article was submitted on 28.07.2025; approved after reviewing on 11.11.2025; accepted for publication on 09.02.2026.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 636.086.15; 631.527 664.6/.7
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o18

CC BY

Комплексная оценка хозяйственной ценности тетраплоидной белозерной пищевой кукурузы (*Zea mays* L.)

М. Ю. Хакулова[1], С. П. Аппаев[1], И. А. Кегадуев[2], А. Ю. Паритов[2], А. И. Бузуртанов[3], И. А. Кибкало[4], Э. Б. Хатефов[4]

[1] Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, Институт сельского хозяйства, Нальчик, Россия

[2] Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия

[3] Ингушский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, Сунжа, Россия

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

Автор, ответственный за переписку: Эдуард Балилович Хатефов, haed1967@rambler.ru

Актуальность. Мировой рынок белозерной кукурузы к 2050 г. ожидает удвоенного роста, несмотря на ее низкую урожайность. Такая популярность объясняется возросшим спросом на безглютеновые продукты и развитием новых технологий пищевых продуктов из кукурузного зерна и муки. Селекция высокоурожайных гибридов белозерной кукурузы с улучшенными питательными свойствами актуальна.

Материалы и методы. Объектом исследования служили 238 образцов белозерной тетраплоидной кукурузы ранних поколений (S_2–S_3). В качестве тестера (материнская форма) использовали белозерную тетраплоидную линию, созданную акад. В. К. Шумным (Институт цитологии и генетики СО РАН). Семенной материл размножали в степной зоне Северокавказского федерального округа. Биохимический состав зерна кукурузы определяли на ИК-анализаторе SupNir 2750 (Китай). Статистическую обработку данных выполнили с использованием программного обеспечения Statistica 10.0 от StatSoft Russia (2023).

Результаты. Создана коллекция из 61 линии S_6-поколения инбридинга с повышенными питательными свойствами и улучшенными морфометрическими признаками. Получены 18 инбредных линий с белым зерном и белым стержнем початка, с повышенной белизной муки и крупы. Выделены 25 линий с повышенным содержанием белка (15–16%), 16 высокомасличных линий (4,5–5,0%) и 17 линий с высоким содержанием крахмала (73–74%), 2 линии с высокой специфической комбинационной способностью на тестер Шумного. Аминокислотный состав зеина в зерновке у тест-кроссов F_1 не выявил выдающихся гибридов, имеющих хозяйственную ценность по накоплению в зеине незаменимых аминокислот. Средняя урожайность 18 комбинаций составила 5,08 ± 0,43 т/га при варьировании признака Cv = 34,86%, $НСР_{05}$ = 0,26 т/га. Установлено, что тестер В. К. Шумного в гибридных комбинациях способствует полеганию растений и его дальнейшее использование нецелесообразно.

Заключение. Образцы тетраплоидной белозерной кукурузы характеризуются рядом хозяйственных признаков, имеющих ценность для гибридной селекции.

Ключевые слова: гибрид кукурузы, белая кукурузная мука, диплоид, тетраплоид, зеин, глютен

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту № 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».

Для цитирования: Хакулова М.Ю., Аппаев С.П., Кегадуев И.А., Паритов А.Ю., Бузуртанов А.И., Кибкало И.А., Хатефов Э.Б. Комплексная оценка хозяйственной ценности тетраплоидной белозерной пищевой кукурузы (*Zea mays* L.). *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(1):62-73. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o18

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

© Хакулова М.Ю., Аппаев С.П., Кегадуев И.А., Паритов А.Ю., Бузуртанов А.И., Кибкало И.А., Хатефов Э.Б., 2026

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o18

Comprehensive assessment of the economic value in tetraploid white-grained food maize (*Zea mays* L.)

Milana Yu. Khakulova[1], Safar P. Appayev[1], Ivan A. Kegaduev[2], Anzor Yu. Paritov[2], Aslanbek I. Buzurtanov[3], Iliya A. Kibkalo[4], Eduard B. Khatefov[4]

[1] *Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Agriculture, Nalchik, Russia*

[2] *Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russia*

[3] *Ingush Scientific Research Institute of Agriculture, Sunzha, Russia*

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

Corresponding author: Eduard B. Khatefov, haed1967@rambler.ru

Background. The global white maize market is expected to double by 2050, despite its low yield. This popularity is driven by increased demand for gluten-free products and the development of new food technologies for maize grain and flour. Breeding high-yielding white maize hybrids with improved nutritional properties is essential.
Materials and methods. The material of the study was 238 accessions of tetraploid white maize of early inbreeding (S2–S3). The tetraploid white-grained line developed by Acad. V. K. Shumny (Institute of Cytology and Genetics, SB RAS) was used as a tester (maternal form). Seed material was reproduced in the steppe zone of the North Caucasian Federal District. The biochemical composition of maize grain was assessed on an IR analyzer SupNir 2750 (China). Statistical data processing was performed using the Statistica 10.0 software from StatSoft Russia (2023).
Results. A collection was made of 61 S_6 inbred lines with enhanced nutritional properties and improved morphometric traits. Eighteen inbred lines with white grain and white cobs, with increased flour and groat whiteness, were obtained. Twenty-five high-protein lines (15–16%), 16 high-oil lines (4.5–5.0%), 17 high-starch lines (73–74%), and 2 lines with high specific combining ability with Shumny's tester were selected. The amino acid composition of zein in the caryopses of F_1 test crosses did not reveal outstanding hybrids with such economic value as the accumulation of essential amino acids in zein. The average yield of 18 combinations was 5.08 ± 0.43 t/ha with the trait variation Cv = 34.86%, LSD_{05} = 0.26 t/ha. It was established that Shumny's tester in hybrid combinations enhanced plant lodging, so its further use is inappropriate
Conclusion. The collection of tetraploid white maize manifested a number of agronomic traits valuable for hybrid breeding.

Keywords: maize hybrid, white maize flour, diploid, tetraploid, zein, gluten

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the state task according to VIR's theme plan of under 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".

For citation: Khakulova M.Yu., Appaev S.P., Kegaduev I.A., Paritov A.Yu., Buzurtanov A.I., Kibkalo I.A., Khatefov E.B. Comprehensive assessment of the economic value in tetraploid white-grained food maize (*Zea mays* L.). *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(1):62-73. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o18

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Кукуруза (*Zea mays* L.), являясь одной из важных зерновых культур в мире, используется в качестве продовольствия, фуража и сырья для большого количества промышленных продуктов (Das et al., 2021; Lone et al., 2021). Зерно кукурузы, основываясь на цвете эндосперма, можно в целом разделить на два широко выращиваемых типа – желтую и белую. Белая кукуруза является основной продовольственной культурой в некоторых странах Африки (Кении, Малави, Танзании и Зимбабве), Центральной и Южной Америки (CIMMYT, FAO, 1997; Rubey et al., 1997). В Российской Федерации белую кукурузу используют в пищу в Северокавказском регионе (Kuzenko, 2022; Galgovskaya et al., 2024). Мировое производство белой кукурузы оценивается в 65–70 миллионов тонн в год, что составляет около 12–13% от всего производства кукурузы. Более 90% белой кукурузы выращивается в развивающихся странах, что составляет около четверти от общего объема производства кукурузы и почти две пятых посевных площадей кукурузы (https://www.fao.org/4/w2698e/w2698e03.htm; López-Pereira, Morris, 1994).

Мировая селекция отдает предпочтение желтозерной кукурузе из-за ее большей обеспеченности каротиноидами в сравнении с белозерной, у которой содержание каротиноидов минимально. Поэтому все источники белозерной кукурузы сосредоточены на семеноводстве сортов или гибридов, заложенных на низкоурожайных белозерных староместных сортах того или иного региона, в основном из-за вкусовых качеств зерна (Malvar et al., 2008; Mukri et al., 2018; Kumar et al., 2022). Желтая окраска образуется благодаря накоплению каротиноидов, таких как каротины и ксантофиллы. В кукурузном зерне основными каротиноидными пигментами являются бета-каротин, бетакриптоксантин, лютеин и зеаксантин (Mangelsdorf, Fraps, 1931). Белый цвет стержня початков, который является предпочтительным для сортов с белым эндоспермом зерновки, в основном регулируется рецессивным аллелем *P-ww* (который также может обозначаться как *p*) в локусе *P* (Coe et al., 1988). Гомозиготное состояние *P-ww* приводит к образованию бесцветных (белых) стержней початков. Аллель *P-ww* может быть представлен в двух формах: с коричневатым оттенком (*P-wwb)* или без него (*Pwww*). Это различие обусловлено наличием ортодигидроксифлавонов, которые влияют на синтез флавонового гликозида майзина в рыльцах (шелковке). В случае наличия ортодигидроксифлавонов происходит синтез майзина, в то время как их отсутствие приводит к блокированию его синтеза (Styles, Ceska, 1977; Coe et al., 1988).

В США, являющихся мировым лидером по производству кукурузы, выращивание белозерной кукурузы составляет менее одного процента от общего объема внутреннего производства кукурузы, производимой в значительной степени в рамках контрактного земледелия из-за относительно ограниченного рынка. Урожайность лучших 27 гибридов белозерной кукурузы в среднем составила 8,59 т/га (гибрид Pioneer X1138AW до 10,00 т/га), у контроля желтозерного гибрида кукурузы Pioneer 3245 она достигала 9,58 т/га (Darrah et al.,1999).

Среди развивающихся стран производство белой кукурузы имеет первостепенное значение в Африке. В этом регионе производят около трети мирового урожая белой кукурузы, что составляет около 90% от общего регионального производства кукурузы (Byerlee, Heisey, 1997). Наблюдающийся рост популярности белозерной кукурузы в последние годы можно объяснить развитием нутрицевтики и появлением новых знаний по сбалансированному питанию. Особый интерес к кукурузе проявляют диетологи из-за отсутствия в зерне кукурузы глютена.

В области селекции в этой связи скорректированы цели – все учреждения, занимающиеся селекцией кукурузы в США, создают белозерные гибриды. Среди них – Pioneer, Dekalb, Garst, Wilson, Vineyard, Asgrow, Zimmerman, IFSI, Agrigold, LG Seeds, NK и Whisnand (названия даны в сокращении без указания компании-владельца). В период до 2050 г. спрос на белозерную кукурузу в развивающихся странах ожидает удвоенного роста производства и потребления (Rosegrant, the IMPACT Development Team, 2008). Благодаря работе селекционеров США и Европы, современные белозерные гибриды обеспечивают урожайность на уровне 90–95% от обычных желтозерных. Около 80% белого кукурузного зерна, которое используется в США, идет на производство таких продуктов, как тортильи, чипсы-тортильи, кукурузные чипсы и лепешки тако. Остальные 20% – это традиционные крупы и мука разных видов. Еще одно специфическое применение белозерной кукурузы – откорм свиней, бройлеров и гусей для получения нежного и белого мяса, которого трудно достичь при кормлении кукурузой с желтым зерном. Такой продукт в основном покупают в Европе. Экспорт белой кукурузы остается важным источником дохода для многих зарубежных и российских фермеров и семеноводческих компаний. Мексика уверенно движется к достижению самообеспеченности белой кукурузой к 2025 г., при этом прогнозируется, что ее предложение в стране превысит 2 млн тонн (https://www.tridge.com/news/mexico-to-reach-white-corn-self-sufficiency--czohfb).

Исследования, направленные на генетическое улучшение зародышевой плазмы белой кукурузы для селекции гибридов с целью удовлетворения потребности населения, предпочитающего белую кукурузу в качестве пищи, актуальны. В связи с этим *целью исследования* было создание исходного селекционного материала белозерной пищевой кукурузы с улучшенными питательными свойствами.

Материалы и методы

Селекционные исследования образцов кукурузы проводили в период с 2021 по 2024 г. в предгорной зоне на территории селекционного участка Кабардино-Балкарского научного центра РАН. В качестве исходного материала использовали 238 образцов белозерной тетраплоидной кукурузы ранних инцухтов (S_2–S_3) среднепоздней группы спелости (ФАО 450). В качестве тестера (материнская форма) использовали белозерную тетраплоидную раннеспелую линию (ФАО 250), созданную акад. В. К. Шумным (Институт цитологии и генетики СО РАН). В качестве стандарта использовали два сорта диплоидной (2n = 20) белозерной пищевой кукурузы ‘Кабардинская Белая Зубовидная’ (КБЗ) и ‘Местная Белая Кремнистая’ (МБК), используемые для производства кукурузной муки и крупы в пищевой промышленности в РФ. Стандарты относились к той же среднепоздней группе спелости (ФАО 450) по классификации ФАО (от 100 до 900), что и испытанные тетраплоидные линии. Диплоидные стандарты были подобраны к тетраплоидным линиям и гибридам из-за отсутствия в мировой и отечественной селекционной практике сортов и гибридов белозер-

ной тетраплоидной кукурузы. Тетраплоидная инбредная линия – тестер Шумного (2n = 40) – не могла служить стандартом из-за того, что относится к другой группе спелости по классификации ФАО, но может служить тестером для гибридных комбинаций.

Для совмещения сроков цветения родительских форм тестер Шумного высевали на 12–15 дней позже отцовских форм, во второй срок. Фенологические наблюдения и учет урожая зерна проводили по методике ВИР (Shmaraev, Matveeva, 1985). Описание биометрических показателей даны согласно широкому унифицированному классификатору СЭВ вида *Zea mays* L. (Kukekov, 1977). Уборочную влажность зерна определяли с помощью влагомера «ФАУНА-М». Биохимический состав зерна кукурузы определяли на ИК-анализаторе SupNir 2750 (Китай). Химический анализ зерна проводили в двукратной повторности. Размножение и гибридизацию осуществляли под пергаменными изоляторами. Статистическая обработка данных была выполнена с использованием программного обеспечения Statistica 10.0 от StatSoft Russia (2023).

Селекционный участок расположен на водоразделе рек Урвань – Нальчик (43°30’29” с. ш., 43°42’11” в. д.) Кабардино-Балкарской республики. Почвенный покров участка представлен лугово-черноземными почвами. Содержание гумуса в пахотном слое составляет 4,2%, реакция почвы по всему почвенному профилю среднещелочная (Рн = 8,1). Емкость поглощения в пахотном слое средняя (32 мг/экв. на 100 г почвы), с глубиной уменьшается постепенно. Содержание карбонатов в пахотном слое среднее (6,7%), глубже – высокое (13,6–14,7%). Обеспеченность почв подвижным фосфором очень низкая (0,4 мг/100 г почвы), а обменным калием – очень высокая (8 г/100 г).

Климат зоны умеренно жаркий. Сумма активных температур – 3000–3200°С. Увлажнение умеренное (коэффициент увлажнения – 0,5–0,9), гидротермический коэффициент равен 0,9–1,2. В среднем в конце второй декады апреля прекращаются заморозки, и среднесуточная температура воздуха переходит через отметку +10°С. Безморозный период составляет 190 дней. Он продолжается до конца октября. В конце июня – начале июля превалируют юго-восточные ветры, часто суховейные. За год отмечается до 17,5 дней с сильным ветром. Сумма осадков за год составляет 615 мм, из них на вегетационный период приходится 75,8% (416 мм) (https://ru.weatherspark.com).

В течение четырех лет исследования посев проводился в оптимальные сроки с 1 по 12 мая на одном селекционном участке с трехпольным севооборотом: горох, пшеница и кукуруза. Первые всходы кукурузы появлялись на 7–10-й день после посева, а полные всходы – на 10-12-й день. Климатические условия роста и развития посевов кукурузы характеризовались недостатком естественных осадков, повышенными среднесуточными температурами и высокой солнечной инсоляцией в период цветения и налива зерна. Несмотря на эти условия агроклиматические факторы в целом способствовали получению урожая зерна (табл. 1).

Таблица 1. Количество осадков за сезон 2021–2024 гг., мм
(по данным метеопункта «Нальчик», Кабардино-Балкарская республика)

Table 1. Precipitation amount for the growing seasons in 2021–2024, mm
(according to Nalchik Weather Station, Kabardino-Balkarian Republic)

Месяцы	Годы				Среднемноголетние значения
	2021	2022	2023	2024	
Май	78,1	64	28,8	43,8	53,6
Июнь	177	66,6	155,4	15,0	103,5
Июль	51,7	17,6	112	2,7	46,0
Август	27,2	13,6	17,4	28,9	21,7
Сентябрь	12,1	27,7	27,1	10,0	26,6
Сумма	612,0	369,3	534,3	270,0	251,4

Схема посева опытных образцов – 70 × 35 см, широкорядная, площадь делянки – 4,9 м^2, повторности – четырехкратная для линий и трехкратная при испытании гибридов. Агротехнические мероприятия проводили в соответствии с методическими рекомендациями по проведению полевых опытов с кукурузой (Sotchenko, 2009).

Результаты и обсуждение

Исследования морфометрических признаков растений и початка, окраски зерна и его биохимического состава показали, что исходные линии ранних инцухтов S_2–S_3 были очень разнородными и не всегда соответствовали типичной белозерной кукурузе с белым зерном и белым стержнем (табл. 2).

В течение нескольких циклов самоопыления и позитивного отбора типичных белозерных образцов с белым стержнем початка удалось выделить 61 линию S_{6-7}-инбредности, которая имела не только белый стержень и зерно, но также характеризовалась повышенной питательной ценностью по основным биохимическим показателям (белок, крахмал, масло). По итогам фенотипической оценки эти образцы характеризовались высокой урожайностью зерна и массой 1000 зерен, устойчивостью к основным возбудителям грибных болезней и полеганию (табл. 3).

Произведенную выборку 18 гибридов, определенных как лучшие по структурным элементам початка, крупности зерна и другим показателям в тест-кроссах с тестером Шумного, скрестили с тестером Шумного, где тетраплоидные линии использовались в качестве отцовских

Таблица 2. Динамика инбридинга и объема выборки линий тетраплоидной белозерной кукурузы по годам исследований

Table 2. Dynamics of inbreeding and the sample size of tetraploid white maize lines by years of research

Параметры Parameters	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.
Инбредность	S_2–S_3	S_3–S_4	S_4–S_5	S_5–S_6
Число изученных образцов	238	300	268	234
Число выделенных образцов	300	268	234	61*
Число выбракованных желтозерных образцов	16	34	20	7

Примечание: 61* – число образцов с белым зерном и белым стержнем початка

Note: 61* – number of accessions with white grain and white cobs

Таблица 3. Морфометрические признаки растений у тетраплоидных линий белозерной кукурузы (2021–2024 гг., Нальчик)

Table 3. Morphometric plant characters in tetraploid white maize lines (2021–2024, Nalchik)

Признаки	Значения за годы исследований						
	2021	2022	2023	2024*	$X_{ср} \pm S_x$	C_v, %	$НСР_{05}$
Длина початка, см	11,05	10,00	12,25	12,07	11,34 ± 1,02	9,16	1,53
Диаметр початка, см	3,61	3,56	3,47	3,43	3,52 ± 0,18	2,34	0,03
Число рядов зерен на початке	11,04	10,71	15,69	14,4	12,71 ± 3,36	19,04	1,38
Число зерен в ряду на початке, шт.	13,49	13,16	13,81	13,5	13,49 ± 0,01	1,97	2,08
Масса 1000 зерен, г	398,15	391,03	405,09	396,8	397,47 ± 1,23	1,45	25,98
Содержание белка, %СВ	11,48	10,45	11,50	11,89	11,33 ± 0,41	5,44	0,21
Содержание крахмала, %СВ	71,86	72,24	71,17	70,77	71,51 ± 1,09	0,93	0,75
Содержание масла, %СВ	3,51	3,38	3,56	3,71	3,54 ± 0,2	3,85	0,31

Примечание: * – в 2024 г. проведен позитивный отбор образцов с белым зерном и белым стержнем початка

Note: * – in 2024, positive selection of accessions with white grain and white cobs was carried out

форм, а тестер – материнской. Результаты анализа морфометрических признаков показали, что гибридные комбинации тестер Шумного × 99-7112-2-3, тестер Шумного × 75-7055-3-1, тестер Шумного × 88-7101-2-2 превзошли урожайность зерна диплоидных стандартов в среднем за два года (табл. 4). Анализ данных по урожайности был не репрезентативным, поскольку использованный в опыте тестер Шумного характеризовался 100-процентным полеганием и передавал это проявление признака всем гибридным комбинациям, в которые он был включен. Гибридные комбинации тестер Шумного × 22-7023-1 и тестер Шумного × 97-7112-2-1 характеризовались меньшей уборочной влажностью зерна (33,8–33,9%), чем диплоидные стандарты (34,4–35,9%). Высокими значениями выше диплоидных стандартов по признаку «масса 1000 зерен» отличались гибриды: тестер Шумного × 97-7112-2-1, тестер Шумного × 99-7112-2-3, тестер Шумного × 101-7112-25, тестер Шумного × 120-7133-1, тестер Шумного × 113-7126-2-1, превысившие оба диплоидных стандарта по массе 1000 зерен на 1–15 г.

Полученные простые гибриды анализировали по хозяйственно ценным признакам и биохимическому составу зерна (табл. 5, 6). Но результаты биохимического анализа были интересны и позволили выявить высокие значения у одного гибрида (тестер Шумного × 101-7112-25) по содержанию клетчатки (3,0%), одного гибрида (тестер Шумного × 78-7055-2-2) по содержанию масла (4,03%), одного гибрида (тестер Шумного × 98-7112-2-2) по содержанию белка (15,63%) и одного гибрида (96-7112-1-3) по высокому содержанию крахмала (71,7%).

В таблице 6 приведены результаты анализа зеина гибридов между линиями тетраплоидной белозерной кукурузы и тестером Шумного по девяти незаменимым аминокислотам: аргинин (Arg), цистеин (Cys), лейцин (Leu), изолейцин (Ile), лизин (Lys), метионин (Met), треонин (Thr), триптофан (Trp) и валин (Val). Эти аминокислоты играют важную роль в биологических процессах, включая синтез белков и метаболизм животных и человека. По результатам анализа аминокислотного состава не удалось обнаружить значимых отличий между гибридами по аминокислотному составу, что объясняется высокой инбредностью тетраплоидного генома родительских линий, который не перекрывается эффектом гетерозиса на уровне простых (двухлинейных) скрещиваний тест-кроссов (см. табл. 4).

Початки двух лучших по урожайности гибридов белозерной тетраплоидной кукурузы тестер Шумного × 75-7055-3-1 (8,0 т/га) и тестер Шумного × 88-7101-2-2 (7,8 т/га) характеризовались выровненностью по цвету зерна и стержня початка, крупным зерном и хорошей озерненностью (выполненностью) початка (рисунок).

Таблица 4. **Морфометрические признаки F_1 тест-кроссов тетраплоидной белозерной кукурузы, характеризующихся повышенными питательными свойствами** (2022–2023 гг., Нальчик)

Table 4. **Morphometric characters in F_1 test crosses of tetraploid white maize characterized by improved nutritional properties** (2022–2023, Nalchik)

Гибриды	Урожай с делянки в пересчете на т/га	Уборочная влажность зерна, %	Вес 1000 зерен, г	Полегание, %	Поражение грибными болезнями (естественный фон), %		
					пузырчатая головня	фузариоз початка	пыльная головня
‘Кабардинская Белая Зубовидная’*	5,45	35,9	407	6,5	0,2	0,1	0
‘Местная Белая Кремнистая’*	6,3	34,45	369,5	4,1	0	0,1	0
тестер Шумного (тШ)**	1,95	22,5	254	100	0,3	6,8	0
тШ × 13-7023-1-3	3,5	37,2	388	0,2	0	0	0
тШ × 22-7023-1	4,1	33,9	361	0,3	0,6	0	0,1
тШ × 4-7006-1-1	6,2	38,3	405	0	0	0	0
тШ × 100-7112-2-4	2,2	35,1	386	3,3	0	0,1	0
тШ × 97-7112-2-1	4,8	33,8	410	0,5	0,2	0	0
тШ × 98-7112-2-2	3,1	36,5	395	0	0,2	0	0
тШ × 99-7112-2-3	7,3	38,8	408	1,8	0	0	0
тШ × 101-7112-25	3,6	36,9	414	0,2	0	0	0
тШ × 120-7133-1	2,9	38,0	420	0	0,5	0	0
тШ × 77-7093-2-1	5,5	35,7	403	1,8	0	0,1	0
тШ × 78-7055-2-2	5,8	34,9	394	0	0	0	0,1
тШ × 75-7055-3-1	8,0	36,2	368	0	1,2	0	0
тШ × 81-7100-1-1	3,3	37,7	382	2,2	0	0,1	0
тШ × 125-7135-3-1	4,5	38,1	396	0	0,3	0	0
тШ × 114-7126-2-2	6,1	36,6	385	0,2	0	0,2	0
тШ × 96-7112-1-3	6,4	37,4	405	2,7	0,2	0,2	0
тШ × 88-7101-2-2	7,8	38,0	390	0,5	0,2	0	0
тШ × 113-7126-2-1	6,3	37,5	417	0	0	0	0
M ± m	5,00 ± 0,43	35,87 ± 0,36	388,4 ± 3,91	5,92 ± 0,26	0,18 ± 0,08	0,03 ± 0,02	0,01 ± 0,01
C_V, %	34,86	4,08	4,07	141,73	165,32	179,43	291,04
σ	1,6	1,5	16,3	1,08	0,31	0,07	0,03
$НСР_{05}$ =	0,26	–	0,59	–	–	–	–

Примечание: * – сорта-стандарты; ** – тестер

Note: * – reference cultivars; ** – tester

Таблица 5. **Результаты химического анализа зерна F_1 тест-кроссов, 2023–2024 гг.**

Table 5. **Results of the chemical analysis of grain in F_1 test crosses, 2023–2024**

Гибриды	Содержание, % сухого вещества			
	Клетчатка	Масло	Белок	Крахмал
‘Кабардинская Белая Зубовидная’*	2,75	3,91	11,93	69,07
‘Местная Белая Кремнистая’*	2,75	3,97	10,39	69,21
тестер Шумного (тШ)**	2,85	3,47	12,19	68,59
тШ × 13-7023-1-3	2,98	3,53	11,65	68,62
тШ × 22-7023-1	2,82	3,81	13,9	65,07
тШ × 4-7006-1-1	2,69	3,79	13,61	65,16
тШ × 100-7112-2-4	2,96	3,37	13,42	67,02
тШ × 97-7112-2-1	2,68	3,71	13,1	66,44
тШ × 98-7112-2-2	2,69	3,48	15,63	62,9
тШ × 99-7112-2-3	2,89	3,74	14,19	64,46
тШ × 101-7112-25	3,0	3,04	9,45	69,89
тШ × 120-7133-1	2,8	3,19	9,34	69,49
тШ × 77-7093-2-1	2,53	3,7	12,9	66,83
тШ × 78-7055-2-2	2,63	4,03	14,49	65,54
тШ × 75-7055-3-1	2,63	3,6	12,84	64,83
тШ × 81-7100-1-1	2,57	3,38	13,06	63,7
тШ × 125-7135-3-1	2,77	3,73	12,98	66,23
тШ × 114-7126-2-2	2,85	3,89	8,97	70,61
тШ × 96-7112-1-3	3,04	3,7	9,86	71,7
тШ × 88-7101-2-2	2,79	3,33	13,65	66,56
тШ × 113-7126-2-1	2,78	3,04	14,39	64,69
$X_{ср}$ признака за 2023 г.	2,72 ± 0,21	3,54 ± 0,24	12,73 ± 1,68	66,85 ± 2,44
$X_{ср}$ признака за 2024 г.	2,78 ± 0,15	3,55 ± 0,28	12,63 ± 1,96	66,65 ± 2,48
Парный t-критерий Стьюдента	1.53	0.65	0.673	1.550
P	0,144	0,520	0,510	0,139
$НСР_{05}$ =	0,08	012	0,31	0,43

Примечание: * – сорта-стандарты; ** – тестер. Значения парного критерия оценивали между 2023 и 2024 г. Поскольку $t_{набл} < t_{крит}$, то изменения признака с 2023 по 2024 г. статистически не значимы

Note: * – reference cultivars; ** – tester. The values of the paired criterion were assessed between 2023 and 2024. Since $t_{obs} < t_{crit}$, the changes in the character from 2023 to 2024 were not statistically significant

Таблица 6. **Аминокислотный состав зеина в зерне тест-кроссов F_1** (2023–2024 гг.)
Table 6. **Amino acid composition of zein in the grain of F_1 test crosses** (2023–2024)

Гибриды	Содержание аминокислот, %								
	Arg	Cys	Leu	Lle	Lys	Met	Thr	Try	Val
‘Кабардинская Белая Зубовидная’*	2,56	0,68	2,21	1,35	2,08	0,45	1,38	0,52	1,60
‘Местная Белая Кремнистая’*	2,55	0,68	2,11	1,31	2,01	0,52	1,41	0,52	1,58
тестер Шумного (тШ)**	2,61	0,69	2,24	1,37	2,10	0,47	1,39	0,53	1,65
тШ ×13-7023-1-3	2,51	0,67	1,99	1,24	1,9	0,57	1,43	0,52	1,53
тШ × 22-7023-1	2,58	0,68	2,22	1,36	2,1	0,43	1,37	0,53	1,62
тШ × 4-7006-1-1	2,62	0,7	2,2	1,36	2,09	0,5	1,42	0,54	1,64
тШ × 100-7112-2-4	2,54	0,68	2,05	1,28	1,96	0,55	1,46	0,53	1,56
тШ × 97-7112-2-1	2,57	0,68	2,18	1,34	2,07	0,45	1,37	0,53	1,61
тШ × 98-7112-2-2	2,61	0,68	2,23	1,36	2,08	0,46	1,40	0,54	1,63
тШ × 99-7112-2-3	2,54	0,66	2,19	1,33	2,05	0,38	1,3	0,52	1,58
тШ × 101-7112-25	2,41	0,64	1,93	1,19	1,82	0,48	1,32	0,49	1,46
тШ × 120-7133-1	2,42	0,65	1,91	1,19	1,84	0,5	1,35	0,50	1,47
тШ × 77-7093-2-1	2,55	0,68	2,12	1,31	2,02	0,48	1,39	0,53	1,57
тШ × 78-7055-2-2	2,65	0,71	2,28	1,41	2,18	0,47	1,43	0,55	1,68
тШ × 75-7055-3-1	2,52	0,66	2,07	1,27	1,95	0,49	1,37	0,52	1,55
тШ × 81-7100-1-1	2,47	0,65	2,01	1,24	1,88	0,51	1,38	0,51	1,51

Таблица 6. окончание

Table 6. The end

Гибриды	Содержание аминокислот, %								
	Arg	Cys	Leu	Lle	Lys	Met	Thr	Try	Val
тШ × 125-7135-3-1	2,59	0,69	2,21	1,36	2,10	0,43	1,37	0,54	1,63
тШ × 114-7126-2-2	2,45	0,65	2,05	1,26	1,95	0,43	1,31	0,5	1,52
тШ × 96-7112-1-3	2,55	0,69	2,08	1,29	2,01	0,50	1,37	0,53	1,57
тШ × 88-7101-2-2	2,60	0,69	2,08	1,30	1,97	0,59	1,46	0,54	1,59
тШ × 113-7126-2-1	2,53	0,66	1,90	1,20	1,77	0,69	1,48	0,52	1,49
$X_{ср}$ признака за 2023 г.	2,51 ± 0,36	0,67 ± 0,04	2,02 ± 0,23	1,27 ± 0,08	2,01 ± 0,34	0,51 ± 0,08	1,40 ± 0,08	0,57 ± 0,05	1,63 ± 0,11
$X_{ср}$ признака за 2024 г.	2,54 ± 0,06	0,64 ± 0,01	2,09 ± 0,11	1,29 ± 0,06	1,98 ± 0,11	0,49 ± 0,07	1,38 ± 0,05	0,52 ± 0,01	1,56 ± 0,06
Парный t-критерий Стьюдента	0,37	–0,14	1,88	0,99	–0,41	–1,77	–1,20	–4,39	–3,14
p	0,710	0,891	0,077	0,335	0,683	0,094	0,243	0,000	0,006
$НСР_{05}$ =	0,01	0,01	0,03	0,02	0,04	0,02	0,01	0,01	0,02

Примечание: * – сорта-стандарты; ** – тестер. Значения парного критерия оценивали между 2023 и 2024 г. Поскольку $t_{набл} < t_{крит}$, то изменения признака с 2023 по 2024 г. статистически не значимы

Note: * – reference cultivars; ** – tester. The values of the paired criterion were assessed between 2023 and 2024. Since $t_{obs} < t_{crit}$, the changes in the character from 2023 to 2024 were not statistically significant



Рисунок. Лучшие гибридные комбинации, выделенные по биохимическому составу зерна: тестер Шумного × 75-7055-3-1 (слева) и тестер Шумного × 88-7101-2-2 (справа), 2023 г.

Figure. The best hybrid combinations identified according to the biochemical composition of their grain: Shumny's tester × 120-7133-1 (left), and Shumny's tester × 98-7112-2-2 (right), 2023

Заключение

Впервые в отечественной и мировой практике получены и испытаны гибриды белозерной пищевой тетраплоидной кукурузы. По результатам комплексной оценки хозяйственной ценности белозерной пищевой тетраплоидной кукурузы создана коллекция 61 линии S_6-инбредности с повышенными питательными свойствами и улучшенными морфометрическими признаками. Получены 8 инбредных линий с белым зерном и белым стержнем, характеризующихся повышенной белизной муки и крупы. На основе результатов химического анализа зерна выделены линии с повышенным содержанием клетчатки (3,0–3,4%): линии 96-7112-1-3 и 101-7112-25; белка (15,63%): линия 98-7112-2-2; масла (4,03%): линия 78-7055-2-2; крахмала (70,6–71,7%): линии 114-7126-2-2 и 96-7112-1-3. Аминокислотный состав белка у тест-кроссов F_1 не выявил выдающихся гибридов, имеющих хозяйственную ценность по накоплению в зеине незаменимых аминокислот. Получены 18 тест-кроссов в паре с тетраплоидным тестером кремнистой белозерной кукурузы (тестер Шумного) с урожайностью зерна в пределах от 2,2 до 8,0 т/га при $НСР_{0,5}$ = 0,26 т/га. Определены лучшие гибридные комбинации с высокой урожайностью и питательной ценностью зерна: тестер Шумного × 75-7055-3-1 (8,0 т/га) и тестер Шумного × 88-7101-2-2. Установлено, что тестер Шумного во всех тест-кроссах способствует повышению полегаемости растений при созревании и его дальнейшее коммерческое использование в гибридных комбинациях невозможно. Исследования по улучшению устойчивости к полеганию гибридов тетраплоидной белозерной кукурузы и их родительских компонентов будут продолжены.

References / Литература

Byerlee D., Heisey P.W. Evolution of the African maize economy. In: D. Byerlee, C.K. Eicher (eds). *Africa's Emerging Maize Revolution*. Boulder, CO: Lynne Rienner Publishers; 1997. p.9-12.

CIMMYT, FAO of the United Nations. White maize: a traditional food grain in developing countries. FAO: Rome; 1997. Available from: https://www.fao.org/4/w2698e/w2698e00.htm#Contents [accessed Sept. 10, 2025].

Coe E.H., Neuffer M.G., Hoisington D.A. The genetics of corn. In: G.F. Sprague, J.W. Dudley (eds). *Corn and Corn Improvement*. 3rd ed. Madison, WI: American Society of Agronomy; 1988. p.81-258.

Correns C. Bastarde zwischen Maisrassen mit besondere Berücksichtigung der Xenien. *Nature*. 1901;65:126. [in German] DOI: 10.1038/065126d0

Darrah L.L., West D.R., Lundquist R.L., Hibbard B.E., Schaafsma A., Lee E.A., Mbuvi S., Poneleit C.G., Betran J., Xu W. White food corn: 2000 performance test. Missouri State Special Report No. 535. Columbia, MO: University of Missouri; 2000. Available from: https://www.ars.usda.gov/research/publications/publication/?seqNo115=118870 [accessed Sept. 10, 2025].

Das A.K., Choudhary M., Kumar P., Karjagi C.G., Yathish K.R., Kuma R. et al. Heterosis in genomic era: advances in the molecular understanding and techniques for rapid exploitation. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2021;40(3):218-242. DOI: 10.1080/07352689.2021.1923185

FAO. White Maize: a Traditional Food Grain in Developing Countries. III. Production: [website]. Available from: https://www.fao.org/4/w2698e/w2698e03.htm [accessed Sept. 10, 2025].

Galgovskaya L.A., Terkina O.V., Romanova A.N. Analysis of the chemical composition of grain of white grain corn hybrids bred by the Federal State Budgetary Institution All-Russian Research Institute of Corn. *News of the Kabardin-Balkar Scientific Center of RAS*. 2024;26(2):64-71. [in Russian] (Галговская Л.А., Теркина О.В., Романова А.Н. Анализ химического состава зерна белозерных гибридов кукурузы селекции ФГБНУ ВНИИ кукурузы. *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2024;26(2):64-71). DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-2-64-71

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).

Kumar S., Das A.K., Naliath R., Kumar R., Karjagi C.G., Sekhar J.C. et al. Potential use of random and linked SSR markers in establishing the true heterotic pattern in maize (*Zea mays*). *Crop and Pasture Science*. 2022;73(12):1345-1353. DOI: 10.1071/CP21376

Kuzenko M.V. White-grain Adygheiskaya corn – keeping traditions. *New technologies*. 2022;18(1):122-128. [in Russian] (Кузенко М.В. Кукуруза белозерная Адыгейская – сохраняя традиции. *Новые технологии*. 2022;18(1):122-128). DOI: 10.47370/2072-0920-2022-18-1-122-128

Lone A.A., Dar Z.A., Gull A., Gazal A., Naseer S., Khan M.H., et al. Breeding maize for food and nutritional security In: A.K. Goyal (ed.). *Cereal Grains. Vol. 1*. London: IntechOpen; 2021. p.39-54. DOI: 10.5772/intechopen.98741

López-Pereira M.A., Morris M.L. Impacts of international maize breeding research in the developing world, 1966–1990. Mexico: CIMMYT; 1994.

Malvar R.A., Revilla P., Moreno-González J., Butrón A., Sotelo J., Ordás A. White maize: genetics of quality and agronomic performance. *Crop Science*. 2008;48(4):1373-1381. DOI: 10.2135/cropsci2007.10.0583

Mangelsdorf P.C., Fraps G.S. A direct quantitative relationship between vitamin A in corn and the number of genes for yellow pigmentation, *Science*. 1931;73(1887):241-242. DOI: 10.1126/science.73.1887.241-b

Mukri G., Kumar R., Rajendran A., Kumar B., Hooda K.S., Karjagi C.G. et al. Strategic selection of white maize inbred lines for tropical adaptation and their utilization in developing stable, medium to long duration maize hybrids. *Maydica*. 2018;63(2):1-8.

Rosegrant M.W.; the IMPACT Development Team. International Model for Policy Analysis of Agricultural Commodities and Trade (IMPACT): model description. Washington, DC: International Food Policy Research Institute; 2008.

Rubey L., Ward R., Tschirley D. Maize research priorities: the role of consumer preferences. In: D. Byerlee, C.K. Eicher (eds). *Africa's Emerging Maize Revolution*. Boulder, CO: Lynne Rienner Publishers; 1997. p.145-156.

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. Prospects of maize cultivation for high-energy feed production (Perspektivy vozdelyvaniya kukuruzy dlya proizvodstva vysokoenergeticheskikh kormov). In: *Breeding. Seed production. Maize cultivation technology (Selektsiya. Semenovodstvo. Tekhnologiya vozdelyvaniya kukuruzy): proceedings of the Scientific and Practical Conference dedicated to the 20th anniversary of the All-Russian Maize Research Institute*. Pyatigorsk: Kavkazskaya Zdravnitsa; 2009. p.12-16. [in Russian] (Сотченко В.С. Перспективы возделывания кукурузы для производства высокоэнергетических кормов. В кн.: *Селекция. Семеноводство. Технология возделывания кукурузы: материалы научно-практической конференции, посвященной 20-летию ГНУ ВНИИ кукурузы*. Пятигорск: Кавказская здравница; 2009. С.12-16).

Styles E.D., Ceska O. The genetic control of flavonoid synthesis in maize. *Canadian Journal of Genetics and Cytology*. 1977;19(2):289-302. DOI: 10.1139/g77-032

TRIDGE. Mexico to Achieve White Corn Self-Sufficiency in 2025: [website]. Available from: https://www.tridge.com/news/mexico-to-reach-white-corn-self-sufficiency-czohfb [accessed Sept. 10, 2025].

Weather Spark. All-year-round weather anywhere on Earth (Pogoda krugly god v lyuboy tochke Zemli): [website]. [in Russian] (Weather Spark. Погода круглый год в любой точке Земли: [сайт]). URL: https://ru.weatherspark.com [дата обращения: 15.09.2025].

Информация об авторах

Милана Юрьевна Хакулова, аспирант, лаборант-исследователь, Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, Институт сельского хозяйства – филиал КБНЦ РАН, 360004 Россия, Нальчик, ул. Кирова, 224, khakulova98mil@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0005-4001-820X

Сафар Пахауович Аппаев, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, Институт сельского хозяйства – филиал КБНЦ РАН, 360004 Россия, Нальчик, ул. Кирова, 224, appaev-safar@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9741-8646

Инал Арсенович Кегадуев, аспирант, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, 360004 Россия, Нальчик, ул. Чернышевского, 173, inalkegaduev@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0009-6149-5952

Анзор Юрьевич Паритов, кандидат биологических наук, доцент, заведующий кафедрой, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, 360004 Нальчик, ул. Чернышевского, 173, paritov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5680-4978

Асланбек Иссаевич Бузуртанов, научный сотрудник, Ингушский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, 386203 Россия, Республика Ингушетия, Сунжа, ул. Осканова, 50, buzurtanov.aslanbek@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3438-5987

Илья Анатольевич Кибкало, кандидат сельскохозяйственных 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, kibk@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-8870-121X

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. Большая Морская, 42, 44, head1967@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0001-5713-2328

Information about the authors

Milana Yu. Khakulova, Postgraduate Student, Laboratory Research Assistant, Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Agriculture – branch of the KBSC RAS, 224 Kirova St., Nalchik 360004, Russia, khakulova98mil@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0005-4001-820X

Safar P. Appaev, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Agriculture – branch of the KBSC RAS, 224 Kirova St., Nalchik 360004, Russia, appaev-safar@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9741-8646

Inal A. Kegaduev, Postgraduate Student, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, 173 Chernyshevskogo St., Nalchik 360004, Russia, inalkegaduev@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0009-6149-5952

Anzor Yu. Paritov, Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Head of a Department, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, 173 Chernyshevskogo St., Nalchik 360004, Russia, paritov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5680-4978

Aslanbek I. Buzurtanov, Researcher, Ingush Scientific Research Institute of Agriculture, 50 Oskanova St., Sunzha 386203, Republic of Ingushetia, Russia, buzurtanov.aslanbek@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3438-5987

Iliya A. Kibkalo, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, kibk@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-8870-121X

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, head1967@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0001-5713-2328

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 25.07.2025; одобрена после рецензирования 08.12.2025; принята к публикации 02.02.2026.
The article was submitted on 25.07.2025; approved after reviewing on 08.12.2025; accepted for publication on 02.02.2026.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 635.21:631.526.325(470+476)
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o19

CC BY

Источники хозяйственно ценных признаков среди межвидовых гибридов, созданных в ВИР, и их использование в селекции картофеля Республики Беларусь

А. В. Чашинский[1], В. А. Козлов[1], Д. В. Башко[1], Н. В. Русецкий[1], И. А. Родькина[1], Н. А. Чалая[2], Е. В. Рогозина[2]

[1] *Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по картофелеводству и плодоовощеводству, Самохваловичи, Беларусь*

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

Автор, ответственный за переписку: Анатолий Владимирович Чашинский, a.chashinski@rambler.ru

Для повышения эффективности картофелеводства необходимо вести постоянную работу по созданию новых высокопродуктивных сортов с комплексом хозяйственно ценных признаков. Эта работа возможна лишь при наличии достаточного количества нового генетически разнообразного материала для селекции картофеля. Поэтому пополнение, изучение и сохранение коллекций генетических ресурсов картофеля в условиях Республики Беларусь для обеспечения отечественной селекции картофеля новыми источниками хозяйственно ценных признаков является важной задачей. Целью наших исследований являлось изучение межвидовых гибридов картофеля, созданных в отделе генетических ресурсов картофеля Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР), по основным хозяйственно ценным признакам (продуктивность, устойчивость к вирусным болезням, фитофторозу, черной ножке, содержание крахмала, пригодность к промышленной переработке на картофелепродукты и др.) для последующего вовлечения в селекционный процесс и маркерный анализ на наличие эффективных аллелей генов, связанных с синтезом углеводов.

В результате проведенных исследований выделены источники устойчивости к оомицету *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary, возбудителям черной ножки, вирусным болезням, источники высокой продуктивности и пригодности к промышленной переработке на картофелепродукты после 5 месяцев холодного хранения без рекондиционирования. По результатам ПЦР-анализа выделены гибриды с наличием маркеров Stp23-8b, InvGF-4d и InvGF-4b эффективных аллелей генов, отвечающих за синтез углеводов в клубнях. Выделенные гибриды рекомендуются в качестве источников хозяйственно ценных признаков для селекции картофеля.

Ключевые слова: источники хозяйственно ценных признаков, устойчивость, фитофтороз, черная ножка, вирусные болезни, продуктивность, пригодность к промышленной переработке

Благодарности: работа выполнялась в рамках Государственной программы «Научно-инновационная деятельность Национальной академии наук Беларуси» на 2021–2025 гг., подпрограммы 3 «Изучение, идентификация и рациональное использование коллекций генетических ресурсов растений»; создание межвидовых гибридов картофеля в отделе генетических ресурсов картофеля ВИР выполнено в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту № FGEM-2025-0005 «Совершенствование подходов и методов *ex situ* сохранения идентифицированного генофонда клубнеплодных культур (картофель, топинамбур) и их диких родичей, разработка технологий их эффективного использования в селекции».

Для цитирования: Чашинский А.В., Козлов В.А., Башко Д.В., Русецкий Н.В., Родькина И.А., Чалая Н.А., Рогозина Е.В. Источники хозяйственно ценных признаков среди межвидовых гибридов, созданных в ВИР, и их использование в селекции картофеля Республики Беларусь. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(1):74-87. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o19

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

© Чашинский А.В., Козлов В.А., Башко Д.В., Русецкий Н.В., Родькина И.А., Чалая Н.А., Рогозина Е.В., 2026

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o19

Sources of valuable agronomic traits among interspecific hybrids developed at VIR and their utilization in potato breeding in the Republic of Belarus

Anatol V. Chashynski[1], Victor A. Kozlov[1], Diana V. Bashko[1], Nicolai V. Rusetski[1], Inna A. Rodkina[1], Nadezda A. Chalaya[2], Elena V. Rogozina[2]

[1] *Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Potato, Fruit and Vegetable Growing, Samokhvalovichy, Belarus*

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

Corresponding author: Anatol V. Chashynski, a.chashinski@rambler.ru

Enhancing the efficiency of potato farming requires continuous development of new highly productive cultivars with a set of valuable agronomic traits. Such work is impossible without a sufficient stock of new, genetically diverse source material for potato breeding. Therefore, expanding, studying, and preserving potato genetic resources collections in the Republic of Belarus is an important task to provide the domestic potato breeding practice with new sources of valuable traits. The objective of this research was to examine interspecific potato hybrids developed at the Potato Genetic Resources Department of the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR) for their key agronomic characters (productivity; resistance to viruses, late blight, and blackleg; starch content; suitability for industrial processing into potato products, etc.) through breeding-oriented assessment and marker analysis searching for effective alleles of genes associated with carbohydrate synthesis.
The research identified sources of resistance to the oomycete *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary, blackleg pathogens, and viruses, as well as sources of high productivity and suitability for industrial processing into potato products after five months of cold storage without reconditioning. The PCR analysis helped to identify hybrids carrying the markers Stp23-8b, InvGF-4d, and InvGF-4b – effective alleles of genes responsible for carbohydrate synthesis in tubers. The identified hybrids are recommended as sources of valuable agronomic traits for potato breeding practice.

Keywords: valuable agronomic trait sources, resistance, *Phytophthora*, blackleg pathogens, viral diseases, productivity, suitability for industrial processing

Acknowledgments: the research work was performed out within the framework of the State Program "Scientific and Innovative Activities of the National Academy of Sciences of Belarus" for 2021–2025, subprogram 3 "Study, Identification, and Rational Use of Collections of Plant Genetic Resources"; the development of interspecific potato hybrids was carried out within the framework of the state task according to the theme plan of VIR, Project 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".

For citation: Chashynski A.V., Kozlov V.A., Bashko D.V, Rusetski N.V., Rodkina I.A., Chalaya N.A., Rogozina E.V. Sources of valuable agronomic traits among interspecific hybrids developed at VIR and their utilization in potato breeding in the Republic of Belarus. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(1):74-87. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o19

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Создание новых высокопродуктивных сортов картофеля с комплексом хозяйственно ценных признаков возможно лишь при наличии достаточного количества нового генетически разнообразного материала для селекции данной культуры. Как показывает мировая практика, те страны, у которых хорошо поставлена работа с генетическими ресурсами, добились на современном этапе значительных успехов в селекции картофеля. Поэтому сохранение уже имеющегося в Беларуси генофонда культурного картофеля (белорусские и иностранные сорта, источники и доноры селекционно ценных признаков, близкородственные и отдаленные гибриды картофеля) и его обогащение новыми генами, способными повысить конкурентоспособность белорусского картофеля, является важнейшей государственной задачей, обеспечивающей продовольственную безопасность Республики Беларусь. В связи с этим лаборатория генетики картофеля Научно-практического центра НАН Беларуси по картофелеводству и плодоовощеводству ведет целенаправленную работу по поиску генетических ресурсов картофеля, их изучению в условиях республики для последующего вовлечения выделенных источников хозяйственно ценных признаков в селекционный процесс.

Сотрудничество между Республикой Беларусь и Российской Федерацией в области селекции картофеля имеет многолетнюю историю. Белорусское отделение Всесоюзного института прикладной ботаники и новых культур, открытое по предложению Н. И. Вавилова в 1925 г., первоначально проводило оценку наиболее урожайных в условиях Беларуси зарубежных сортов картофеля. В 1930-е годы в республике началась селекция картофеля методом межвидовой гибридизации, сначала на основе образцов культурного андийского вида *Solanum andigenum* Juz. et Buk. и дикого североамериканского вида *S. demissum* Lindl. из коллекции ВИР (Всесоюзного института растениеводства). В дальнейшем, под руководством П. И. Альсмика, сотрудники Белорусского НИИ плодоводства, овощеводства и картофелеводства расширяли перечень диких родичей картофеля, вовлекаемых в скрещивания, проводили масштабную работу по межвидовой гибридизации, что позволило создать сорта с повышенным содержанием крахмала, протеина, устойчивые к фитофторозу, картофельной нематоде (Kolyadko et al., 2007). Источником генетического разнообразия для селекции картофеля в Беларуси, как в прошлые годы, так и в настоящее время, являются сорта, клоны межвидовых гибридов, образцы диких и культурных видов картофеля из коллекции ВИР (Kozlov et al., 2007; Kozlov, Rogozina, 2014).

В ВИР на основе коллекционных образцов, представителей разных групп картофеля, созданы уникальные межвидовые гибриды: устойчивые к фитофторозу, Y-вирусу картофеля (YВК), золотистой картофельной нематоде и возбудителю рака картофеля, с комплексом хозяйственно полезных признаков. У картофеля продуктивность, качество клубней, устойчивость к бактериальным и некоторым грибным болезням контролируют полигены, и проявление таких признаков зависит от взаимодействия конкретного генотипа с определенными условиями среды (Slater et al., 2014). Поэтому для объективной и всесторонней оценки селекционного материала лучшие коллекционные образцы сортов и клонов межвидовых гибридов картофеля постоянно изучаются в филиалах ВИР и в научно-исследовательских учреждениях, расположенных в разных агроклиматических зонах Российской Федерации (Simakov et al., 2017; Khlopyuk et al., 2021; Ivashchenko et al., 2024). Испытание образцов из коллекции картофеля ВИР в Республике Беларусь представляет особый интерес, поскольку почвенно-климатические условия республики в целом оптимальны для получения высоких, стабильных и дешевых урожаев картофеля (Rudenko, Kovalchuk, 1971). Однако изменение климата, наблюдаемое на планете в последнее время, происходит и на территории Беларуси, где отмечено устойчивое потепление, увеличение продолжительности безморозного периода, чередование засушливых периодов с выпадением осадков ливневого характера (Piskun, 2021). Известно, что потепление климата приводит к усилению вредоносности распространенных и появлению новых фитопатогенов. В Республике Беларусь в последние годы отмечено проявление фитофтороза в ранние (во второй декаде июня) сроки (Busko et al., 2014).

Из бактериозов картофеля наиболее вредоносным и широко распространенным в Республике Беларусь является черная ножка (возбудители – пектолитические бактерии родов *Pseudomonas*, *Erwinia*, *Dickeya*). В условиях несоблюдения агротехнических мероприятий возделывания картофеля, а также при использовании для посадки низкокачественных семян потери урожая от поражения черной ножкой могут достигать 50–75% (Izrailsky, 1979). По данным В. Г. Иванюка с соавторами, при хранении потери клубней составляют 10–20%, а в особо благоприятные для возбудителя годы – 30–50% (Ivanyuk et al., 2005). В России черная ножка – один из наиболее вредоносных бактериозов картофеля – встречается повсеместно, причиняя ущерб, в зависимости от погодных условий и агрессивности патогена, от 1–2 до 50–75% урожая (Ignatov et al., 2018).

Вирусные болезни картофеля широко распространены и являются основной причиной вырождения сортов, приводя к значительным потерям урожая. Из описанных в литературе вирусов картофеля 6–9 причиняют значительный вред посадкам картофеля (Schuhmann, 1994). Так как большинство вирусов передаются с больными клубнями, то без постоянной замены семенного материала происходит быстрое снижение урожая, потери которого могут достигать значительных размеров. Наличие в посадках только 1% растений, пораженных наиболее опасными вирусами, приводит к снижению общего урожая на 0,5–0,6% (Spaar et al., 2004).

Вирусы распространены во всех странах, где возделывается картофель, однако видовой их состав и степень пораженности посадок картофеля различны в зависимости от природных и хозяйственных условий, сортов, состояния семеноводства. К настоящему времени в мире известно около 50 вирусов картофеля. В Республике Беларусь повсеместно распространены вирусы X (PVX), Y (PVY), M (PVM), S (PVS). Ограниченное распространение имеют: вирус L (PLRV), вирус A (PVA), вирус F (PAMV), вирус метельчатости верхушки картофеля, или моп-топ-вирус (PMTV), вирус черной пятнистости томатов (TBRV), вирус мозаики люцерны, или калико (AMV), вирус пестростебельности картофеля, или Rattle-вирус (TRV) (Blotskaya, 2000).

В этой связи оценка образцов из коллекции картофеля ВИР на устойчивость к возбудителям болезней, по продуктивности и качеству клубней в условиях Беларуси имеет важное значение для более полной характеризации селекционного потенциала созданных гибридных клонов картофеля. *Цель исследования* – комплексное изучение межвидовых гибридов картофеля, созданных

в отделе генетических ресурсов картофеля Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР), по основным хозяйственно ценным признакам (продуктивность, устойчивость к вирусным болезням, фитофторозу, черной ножке, содержание крахмала, пригодность к промышленной переработке на картофелепродукты и др.) для последующего вовлечения в селекционный процесс и маркерный анализ на наличие эффективных аллелей генов, связанных с синтезом углеводов.

Материалы и методы

В течение 2021–2023 гг. в условиях Республики Беларусь 19 межвидовых гибридов картофеля, созданных в отделе генетических ресурсов картофеля ВИР (табл. 1), изучены по основным хозяйственно ценным признакам (продуктивность, устойчивость к вирусным болезням, фитофторозу, черной ножке, содержание крахмала, пригодность к промышленной переработке на картофелепродукты).

Таблица 1. Межвидовые гибриды картофеля из коллекции ВИР, оцененные в условиях Беларуси в 2021–2023 гг.

Table 1. Interspecific potato hybrid clones from the VIR collection tested in Belarus in 2021–2023

Номер по каталогу ВИР*	Гибрид	Гибридная формула
П-551	24-1	Atzimba × *S. alandiae* к-21240
П-564	39-1-2005	Atzimba × *S. alandiae* к-21240
П-264	135-1-2006	Свитанок Киевский × (Atzimba × *S. alandiae* к-21240)
П-242	99-4-1	[Runo × F2 (Sunia × *S. stoloniferum* к-2490)] × Hertha
б. н.	8-3-2004	*S. okadae* к-20921 × *S. chacoense* к-19759
П-260	135-5-2005	*S. okadae* к-20921 × *S. chacoense* к-19759
П-596	12/01-09	F4 (*S. pinnatisectum* × Fausta)
к-25627	13/11-09	F2 (*S. pinnatisectum*× Gitte) × ♂ МГ
к-25618	190-4	Гибридный 14 × /Приекульский ранний ×{F2 [Wilja × (*S. andigenum* US-W 1793 × *S. rybinii* k-2890-4)]}/
к-24522	99-6-10	{F2 [Wilja × (*S. andigenum* US-W 1793 × *S. rybinii* k-2890-4)] × CIP-1039} × Hertha
П-591	118-6-2011	F2 (Bobr × /{[(*S. andigenum* US-W 1793 × *S. rybinii* k-2890-4) × Atzimba] × [(*S. andigenum* US-W 1793 × *S. rybinii* k-2890-4) × Tunika]} × CIP-1035/)
к-25615	171-3	F2 (Bobr × /{[(*S. andigenum* US-W 1793 × *S. rybinii* k-2890-4) × Atzimba] × [(*S. andigenum* US-W 1793 × *S. rybinii* k-2890-4) × Tunika]} × CIP-1035/)
П-247	160-1	F2 (Bobr × /{[(*S. andigenum* US-W 1793 × *S. rybinii* k-2890-4) × Atzimba] × [(*S. andigenum* US-W 1793 × *S. rybinii* k-2890-4) × Tunika]} × CIP-1035/)
П-589	138-3-2006	Загадка Питера × (Bobr × /{[(*S. andigenum* US-W 1793 × *S. rybinii* k-2890-4) × Atzimba] × [(*S. andigenum* US-W 1793 × *S. rybinii* k-2890-4) × Tunika]} × CIP-1035/)
П-238	97-152-8	/{[Primerosa × (*S.andigenum* US-W 1793 × *S.rybinii* k-2890-4)] × (Sunia × *S. stoloniferum* k-2490-5)} / × /{[(*S.andigenum* US-W 1793 × *S.rybinii* k-2890-4) × Atzimba] × [(*S.andigenum* US-W 1793 × *S .rybinii* k-2890-4) × Tunica]} × I-1035/
к-24517	97-159-3	/{[Primerosa × (*S. andigenum* US-W 1793 × *S. rybinii* k-2890-4)] × (Sunia × *S. stoloniferum* k-2490-5)} × CIP-1035/ × /CIP-1035 × {[(*S. andigenum* US-W 1793 × *S. rybinii* k-2890-4) × Atzimba] × [(*S. andigenum* US-W 1793 × *S. rybinii* k-2890-4) × Tunika]}/
к-25616	40-2000	F2 /{[(*S. polytrichon* × MPI 50-140/5) × Umbra] × Fausta} × {[(*S. simplicifolium* × MPI 50-140/5) × Gitte] × Hera}/
б. н.	38 КВА	Фермер × /F4{F2 [(*S. polytrichon* × MPI 50-140/5) × MPI 50-140/5]} × F2 {[(*S. simplicifolium* × MPI 50-140/5) × Gitte] × Gera}/
к-25628	16/27-09	|[(*S. berthaultii* × Tajga) × Омега] × F2[(*S. polytrichon* × MPI 50-140/5) × MPI 50-140/5] × F2{[(*S. simplicifolium* × MPI 50-140/5) × Gitte] × Gera}]| × Наяда

Примечание: * – П- – временный каталог; б. н. – номер отсутствует; к- – постоянный каталог

Note: * – П- – temporary catalogue; б. н. – no number; к- – permanent catalogue

Полевые опыты закладывали на полях селекционного севооборота Научно-практического центр НАН Беларуси по картофелеводству и плодоовощеводству. Почва опытных участков дерново-подзолистая, легкосуглинистая, развивающаяся на лессовидном суглинке. Предшественник – озимый рапс. Агротехника общепринятая для селекционных питомников.

Метеорологические условия 2021–2023 гг. способствовали эпифитотийному развитию фитофтороза, что позволило в полевых условиях на естественном инфекционном фоне дать объективную оценку устойчивости к заболеванию исследуемых образцов. Оценку устойчивости гибридов картофеля к фитофторозу листьев вычисляли с помощью показателя «площадь нарастания под кривой развития болезни» – AUDPC (area under the disease progress curve) по формуле (Fry, 1978):

$$AUDPC = \sum_{i=1}^{n}\left[\frac{(x_{i+1}+x_i)}{2}\times(t_{i+1}-t_i)\right],$$

где *AUDPC* – площадь нарастания под кривой развития болезни; x_i – доля пораженной ткани к *i*-ому наблюдению; *t* – время (дни) после инокуляции до *i*-го наблюдения; *n* – число наблюдений.

Ежегодно проводили не менее трех учетов поражения растений фитофторозом.

Оценку гибридов по устойчивости клубней к фитофторозу и черной ножке проводили в баллах (1 – низкая устойчивость, 9 – очень высокая) в соответствии с методическими рекомендациями «Методы оценки картофеля, овощных и плодовых культур на устойчивость к болезням» (Dorozhkin, Ivanyuk, 1987). Оценку устойчивости образцов картофеля к вирусам выполняли по методике Н. П. Скляровой и Р. В. Черепановой (Sklyarova, Cherepanova, 1978).

Фенологические наблюдения проводили согласно «Методическим указаниям по поддержанию и изучению мировой коллекции картофеля» (Bukasov et al., 1976).

Учет урожая и его структуру, определение содержания крахмала выполняли в соответствии с «Методикой исследований по культуре картофеля» (Andryushina et al., 1967). Оценку гибридов по пригодности к промышленной переработке на картофелепродукты проводили после 5 месяцев холодного хранения без рекондиционирования в баллах (1 – низкая пригодность, 9 – очень высокая пригодность к переработке). О пригодности гибридов судили по цвету ломтиков хрустящего картофеля, обжаренных на растительном масле. Цвет ломтиков определяли согласно «Методическим рекомендациям по специализированной оценке сортов картофеля» (Banadysev et al., 2003).

Тестирование гибридов картофеля на наличие X-, Y-, S-, M-, L-, A-вирусов выполняли с использованием иммуноферментного диагностического набора для определения вирусов картофеля производства НПО «БиоТехнологии» при Федеральном исследовательском центре картофеля имени А.Г. Лорха (Москва, Коренево) согласно рекомендации производителя (Instruction for using..., 1993). Межвидовые гибриды протестированы на наличие эффективных аллелей генов, кодирующих ферменты, которые функционируют в углеводном обмене картофеля: *StpL*, кодирующего фермент крахмалфосфорилаза L-типа; *Stp23*, кодирующего фермент альфа-глюкан фосфорилаза; *AGPaseS-a*, кодирующего фермент АДФ-глюкозопирофосфорилаза; *Inv-ap-b*, кодирующего фермент инвертаза; *Pain1*, кодирующего фермент кислая вакуолярная инвертаза. Наличие или отсутствие эффективных аллелей генов, связанных с синтезом углеводов, определяли с использованием ДНК-маркеров: StpL-3e, StpL-3b, Stp23-8b, AGPsS-10a, AGPsS-9a, InvGF-4d, InvGF-4b и Pain 1-8c (Li et al., 2005, 2008, 2013) (табл. 2). Праймеры синтезировали в ОДО «Праймтех» (Республика Беларусь).

Для выделения ДНК применяли набор реагентов «АртСпин» (ООО «АртБиоТех») согласно протоколу производителя. Премикс для постановки классической ПЦР

Таблица 2. Маркеры и условия для идентификации отдельных локусов, связанных с синтезом углеводов методом ПЦР

Table 2. Markers and conditions for identification of individual loci associated with carbohydrate synthesis by PCR

Маркер	Последовательность праймера (5'→3')	T°m, °C	Размер маркерного фрагмента, пн
Pain 1-8c	F CACATAATCAACGTGATGTTTAAGTA R GGTAATAGTAATTGCTTCTAACCG	65	703
Stp23-8b	F CGCATCAGAAAAAACCTCGG R ACCTCCTCCTGACCATCTTT	65	348
StpL-3b	F GAAGAAGTTTCTCTGTTAGCCAC R CGAGTGACGTCTGTAGTTATACTAG	65	1236
StpL-3e	F GGACCCTTTGTATTTTCAGGA R AAAGCTCTTCCCTGAAAGAAC	65	360
AGPsS-9a	F CTGCTTTCTTGCTTAGTTTTACC R CATTTTTCAGAAATTATATCAGGTG	63	210
AGPsS-10a	F GAAAATTTATCCTGAACAAACACCCA R GTTAATAGGAAGCTAACCTCCTC	65	449
InvGF-4b	F GGGCTTTGCCAGTTATCTTAGTT R GTTGTTCAGATGGTAAGTACTGG	61	296
InvGF-4d	F TGGGCTTTGCCAGTTATCTTA R GGTTGTTCAGATGGTAAGTATAG	63	248

включал: готовую смесь для ПЦР-анализа Quick-loadTaq 2XMasterMix (ОДО «Праймтех», Республика Беларусь), соответствующие праймеры (прямой и обратный), матрицу ДНК (2 мкл) и деионизированную воду в количестве, необходимом для доведения объема смеси до 25 мкл. В состав Quick-load Taq 2X Master Mix входили все необходимые компоненты ПЦР: ДНК полимераза, dNTPs, Mg2+ и реакционный буфер, а также красители для непосредственного нанесения реакционной смеси на гель при проведении электрофоретического анализа. Визуализацию продуктов амплификации проводили разделением в 2-процентном агарозном геле, окрашенном бромистым этидием, с последующей регистрацией результатов с помощью оборудования системы гель-документирования DOC-PRINT-VX2 (http://primetech.by/index.php?route=module/downloads).

Анализ экспериментальных данных проводили в программе Statistica 13, методами описательного, корреляционного и кластерного анализов.

Результаты и обсуждение

В результате трехлетних исследований 19 клонов межвидовых гибридов картофеля из коллекции ВИР (см. табл. 1) установлено, что 10 клонов по устойчивости к фитофторозу листьев превосходят белорусские сорта-стандарты (табл. 3). Лучшие по этому показателю – гибриды 24-1 и 16/27-09, у которых размер площади под кривой нарастания болезни (AUDPC) составляет 0,15–0,17 (см. табл. 3). Данные образцы могут быть использованы в селекции как источники фитофтороустойчивости. Средней устойчивостью к фитофторозу листьев характеризовались гибриды 40-2000, 97-152-8, 160-1, 190-4, 13/11-09, 39-1-2005, 99-4-1 и 171-3. Остальные образцы имели низкую устойчивость к фитофторозу.

В период хранения межвидовые гибриды в лабораторных условиях изучены по устойчивости клубней к фитофторозу и черной ножке (рис. 1, 2).

Относительно высокой устойчивостью к фитофторозу клубней характеризовались гибриды 97-152-8 и 99-4-1 (балл устойчивости – 7,0–7,3). Средняя устойчивость (на уровне сорта ‘Здабытак’) отмечена у образцов 118-6-2011 и 16/27-09. Остальные гибриды и сорта картофеля показали низкий уровень устойчивости клубней к фитофторозу (см. рис. 1).

Высокой устойчивостью к черной ножке клубней характеризовались гибриды 190-4, 38 КВА и 118-6-2011. Относительно высокая устойчивость (на уровне сорта ‘Вектор’) отмечена у образцов 99-6-10, 40-2000, 97-152-8, 135-1-2006, 135-5-2005, 24-1, 8-3-2004, 97-159-3. 39-1-2005, 99-4-1 и 138-3-2006 (см. рис. 2). Остальные образцы характеризовались средней устойчивостью клубней к черной ножке.

Среди межвидовых гибридов картофеля выявлены образцы с групповой устойчивостью к фитофторозу и черной ножке. Гибриды 97-152-8 и 99-4-1 показали относительно высокую устойчивость клубней к фитофторозу и черной ножке (более 7 баллов в обоих тестах). У образца 118-6-2011 отмечена высокая устойчивость клубней к черной ножке (8 баллов) и устойчивость к фитофторозу клубней на уровне 6,9 балла. У гибрида 24-1 выявлена относительная высокая устойчивость к фитофторозу листьев и к черной ножке клубней. Корреляции между устойчивостью к фитофторозу листьев и клубней у изученных гибридов картофеля не выявлено.

В период вегетации в фазу «бутонизация – цветение» проведен отбор листовых проб и анализ на наличие скрытой вирусной инфекции у изучаемых образцов. Характеристика образцов по пораженности вирусными болезнями представлена в таблице 4.

Таблица 3. Характеристика гибридов и сортов картофеля по устойчивости к фитофторозу листьев, 2021–2023 гг.

Table 3. Characterization of potato hybrids and cultivars for leaf resistance to late blight, 2021–2023

Гибрид	Поражение ботвы фитофторозом в последнюю декаду августа, %	AUDPC*	Гибрид	Поражение ботвы фитофторозом в последнюю декаду августа, %	AUDPC*
24-1	25	0,15	160-1	40	0,18
39-1-2005	40	0,20	138-3-2006	80	0,38
135-1-2006	90	0,56	97-152-8	50	0,20
99-4-1	45	0,20	97-159-3	80	0,49
8-3-2004	80	0,46	40-2000	50	0,20
135-5-2005	75	0,37	38 КВА	75	0,37
12/01-09	75	0,37	16/27-09	25	0,17
13/11-09	40	0,18	‘Лилея’	95	0,58
190-4	40	0,18	‘Манифест’	95	0,58
99-6-10	75	0,37	‘Скарб’	95	0,57
118-6-2011	85	0,38	‘Вектар’	80	0,46
171-3	40	0,19	‘Здабытак’	75	0,37

Примечание: * – AUDPC – площадь нарастания под кривой развития болезни

Note: * – AUDPC is the area under the disease progress curve

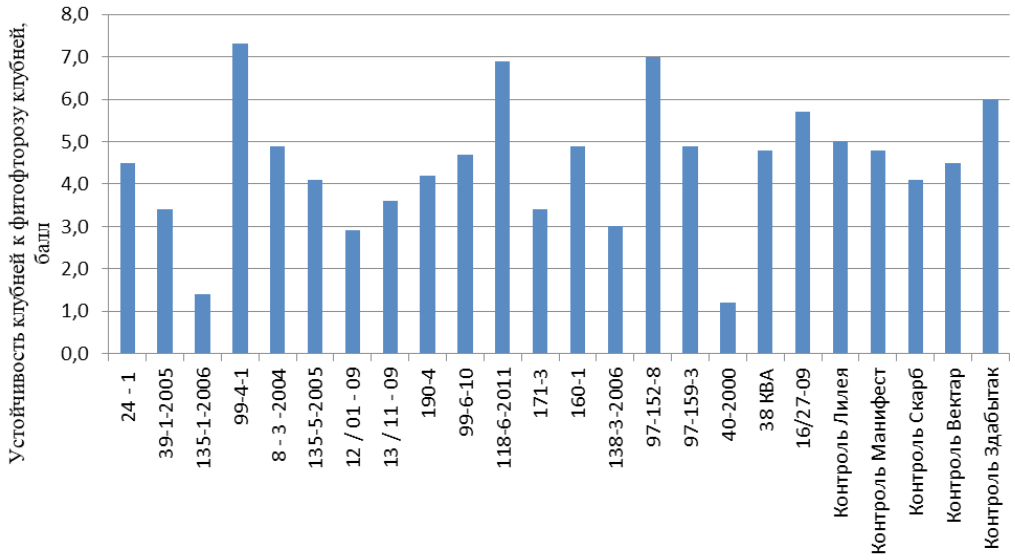


Рис. 1. **Характеристика гибридов и сортов картофеля по устойчивости клубней к фитофторозу, 2021–2023 гг.**
Fig. 1. **Characterization of potato hybrids and cultivars for tuber resistance to late blight, 2021–2023**

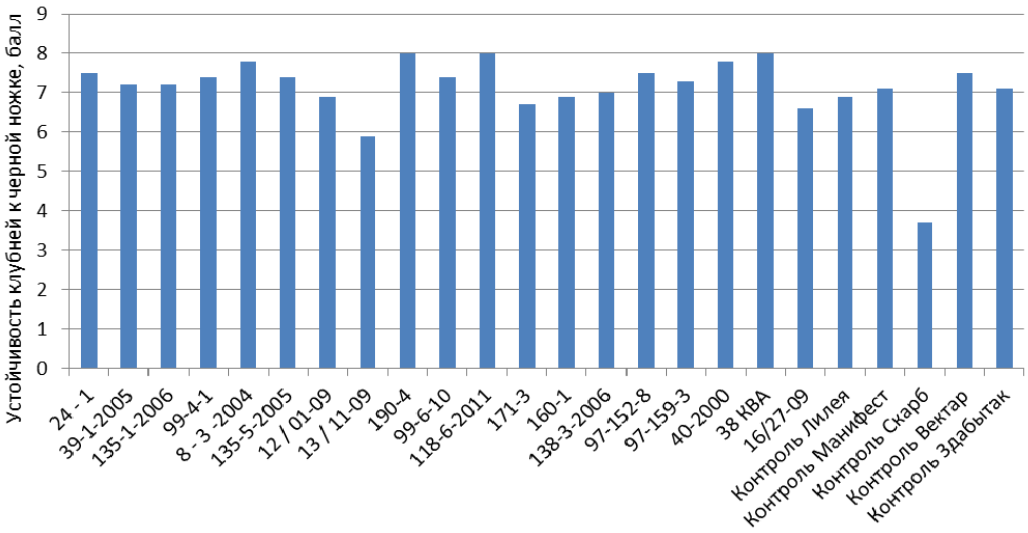


Рис. 2. **Характеристика гибридов и сортов картофеля по устойчивости клубней к черной ножке, 2021–2023 гг.**
Fig. 2. **Characterization of potato hybrids and cultivars for tuber resistance to blackleg, 2021–2023**

Изучение наличия скрытой вирусной инфекции методом ИФА показало, что все образцы содержали инфекцию M-вируса картофеля на уровне 100%, за исключением гибридов 171-3 и 138-3-2006 с уровнем поражения 78 и 86% соответственно (см. табл. 3).

Среди исследуемого материала не содержали инфекцию S-вируса картофеля только два гибрида: 138-3-2006 и 8-3-2004. Невысокий уровень поражения данным вирусом на уровне 10–25% был отмечен у образцов: 38 КВА, 160-1, 39-1-2005, 99-4-1, 16/27-09 и 135-1-2006. Средний уровень поражения (29%) наблюдался у гибрида 118-6-2011. Остальные образцы были поражены вирусом S от 71 до 100%.

Пораженность испытываемых образцов Y-вирусом картофеля была невысокой и выявлена только у четырех гибридов: 99-4-1, 16/27-09, 171-3 и 38 КВА – 12, 10, 11 и 20% соответственно.

Поражение X-вирусом на уровне 10% отмечено лишь у одного исследуемого гибрида – 16/27-09, остальные образцы не содержали данный вирус. Вирусы L и A у изученных образцов не выявлены.

На основе результатов оценки гибридов картофеля по устойчивости к болезням в условиях Республики Беларусь проведена их группировка методами кластерного анализа: иерархического и k-средних. Установлено, что 19 изученных гибридов картофеля представляют два кластера, объединяющих 10 и 9 гибридов соответственно (рис. 3).

В первый кластер входят гибриды с более высокой устойчивостью к фитофторозу листьев (среднее значение – 4,5 балла) и к вирусу Y картофеля (8,6 баллов). Во второй кластер входят гибриды с более высокой устойчивостью клубней к фитофторозу и черной ножке (средние значения – 4,7 и 7,4 балла соответственно) и вирусу S картофеля (7,4 балла). Отметим, что в разные кластеры сгруппированы гибриды, имеющие общее происхождение: 24-1 и 39-1-2005 или 8-3-2004 и 135-5-2005 (см. табл. 1, рис. 3). Различия между сибсами (потомками од-

Таблица 4. Поражение гибридов картофеля вирусной инфекцией по результатам ИФА, 2021–2023 гг.
Table 4. Infestation of potato hybrids with viruses based on the ELISA test, 2021–2023

Гибрид	Пораженность вирусами, %						Устойчивость к вирусам, балл					
	X	Y	S	M	L	A	X	Y	S	M	L	A
24-1	0	0	71	100	0	0	9	9	3	1	9	9
39-1-2005	0	0	22	100	0	0	9	9	7	1	9	9
135-1-2006	0	0	17	100	0	0	9	9	7	1	9	9
99-4-1	0	12	25	100	0	0	9	5	7	1	9	9
8-3-2004	0	0	0	100	0	0	9	9	9	1	9	9
135-5-2005	0	0	100	100	0	0	9	9	1	1	9	9
12/01-09	0	0	100	100	0	0	9	9	1	1	9	9
13/11-09	0	0	100	100	0	0	9	9	1	1	9	9
190-4	0	0	75	100	0	0	9	9	3	1	9	9
99-6-10	0	0	100	100	0	0	9	9	1	1	9	9
118-6-2011	0	0	29	100	0	0	9	9	5	1	9	9
171-3	0	11	78	78	0	0	9	5	1	1	9	9
160-1	0	0	14	100	0	0	9	9	7	1	9	9
138-3-2006	0	0	0	86	0	0	9	9	9	1	9	9
97-152-8	0	0	100	100	0	0	9	9	1	1	9	9
97-159-3	0	0	100	100	0	0	9	9	1	1	9	9
40-2000	0	0	100	100	0	0	9	9	1	1	9	9
38 КВА	0	20	20	100	0	0	9	5	5	1	9	9
16/27-09	10	10	10	100	0	0	9	7	9	1	9	9

Примечание: устойчивость к вирусам оценена по шкале 1–9, где 9 – очень высокая устойчивость, 8 – высокая, 7 – относительно высокая, 5 – средняя, 3 – низкая и 1 – очень низкая устойчивость

Note: virus resistance is assessed according to the scale of 1–9, where 9 is very high resistance, 8 is high resistance, 7 is relatively high resistance, 5 is medium resistance, 3 is low resistance, and 1 is very low resistance

ной пары родителей) наиболее заметны по реакции на S-вирус и при заражении фитофторозом клубней (см. рис. 1, табл. 4).

На основе совокупности полученных данных о реакциях межвидовых гибридов картофеля на инфицирование возбудителями фитофтороза, черной ножки и вирусных заболеваний в условиях Республики Беларусь определена их селекционная ценность как источников групповой устойчивости к болезням. Результаты кластеризации методом двувходового объединения представлены на рисунке 4.

Среди 19 межвидовых гибридов картофеля, изученных в течение трех лет в Республике Беларусь, у образца 16/27-09 выявлена комбинация лучших показателей при оценке на устойчивость к болезням (см. рис. 4). Гибрид 16/27-09 проявляет высокую устойчивость к фитофторозу листьев, среднюю – к фитофторозу и черной ножке клубней, отличается невысоким уровнем поражения Y-вирусом. Гибриды 118-6-2011 и 97-152-8 проявляют устойчивость клубней к фитофторозу и черной ножке, но восприимчивы к фитофторозу листьев, поражаются вирусом S в средней и сильной степени соответственно.

В послеуборочный период гибриды картофеля изучены по продуктивности и содержанию крахмала в клубнях. После пяти месяцев хранения проведена оценка образцов по пригодности к промышленной переработке на картофелепродукты. Результаты приведены в таблице 5.

Высокой продуктивностью (более 1000 г/куст по результатам трехлетних испытаний) характеризовались образцы 97-159-3, 16/27-09, 160-1, 8-3-2004 и 190-4. По этому показателю данные гибриды соответствуют сортам, что позволяет рекомендовать их для использования в селекционной работе как источники высокой продуктивности. У восьми гибридов продуктивность в среднем за три года составила 746–914 г/куст.

Среднее содержание крахмала (16,6–16,9%) имели гибриды 16/27-09 и 135-1-2006, уступая по этому показателю только сорту ‘Здабытак’ (см. табл. 5). Крахмалистость на уровне 14,1–14,9% показали образцы 39-1-2005, 24-1, 160-1, 138-3-2006 и 38КВА. У остальных гибридов и сортов картофеля отмечено более низкое содержание крахмала в клубнях.

Относительно высокой пригодностью к промышленной переработке на картофелепродукты после 5 месяцев холодного хранения без рекондиционирования (7 бал-

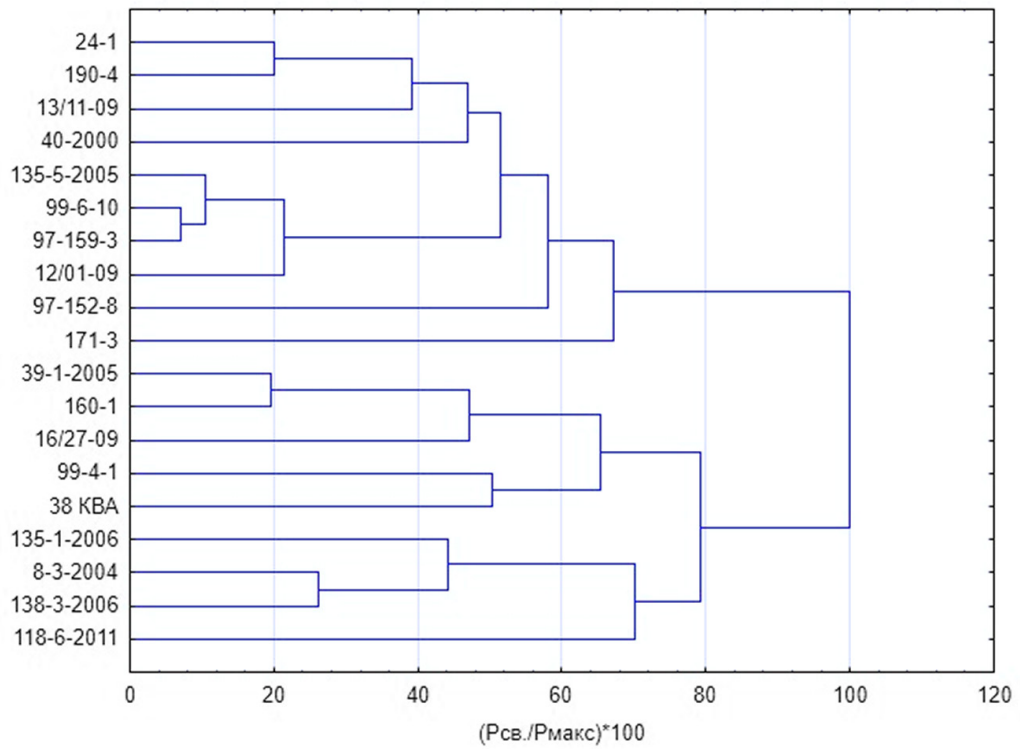


Рис. 3. **Иерархическая кластеризация гибридов картофеля по устойчивости к болезням в условиях Беларуси**

Fig. 3. **Hierarchical clustering of potato hybrids according to disease resistance in Belarus**

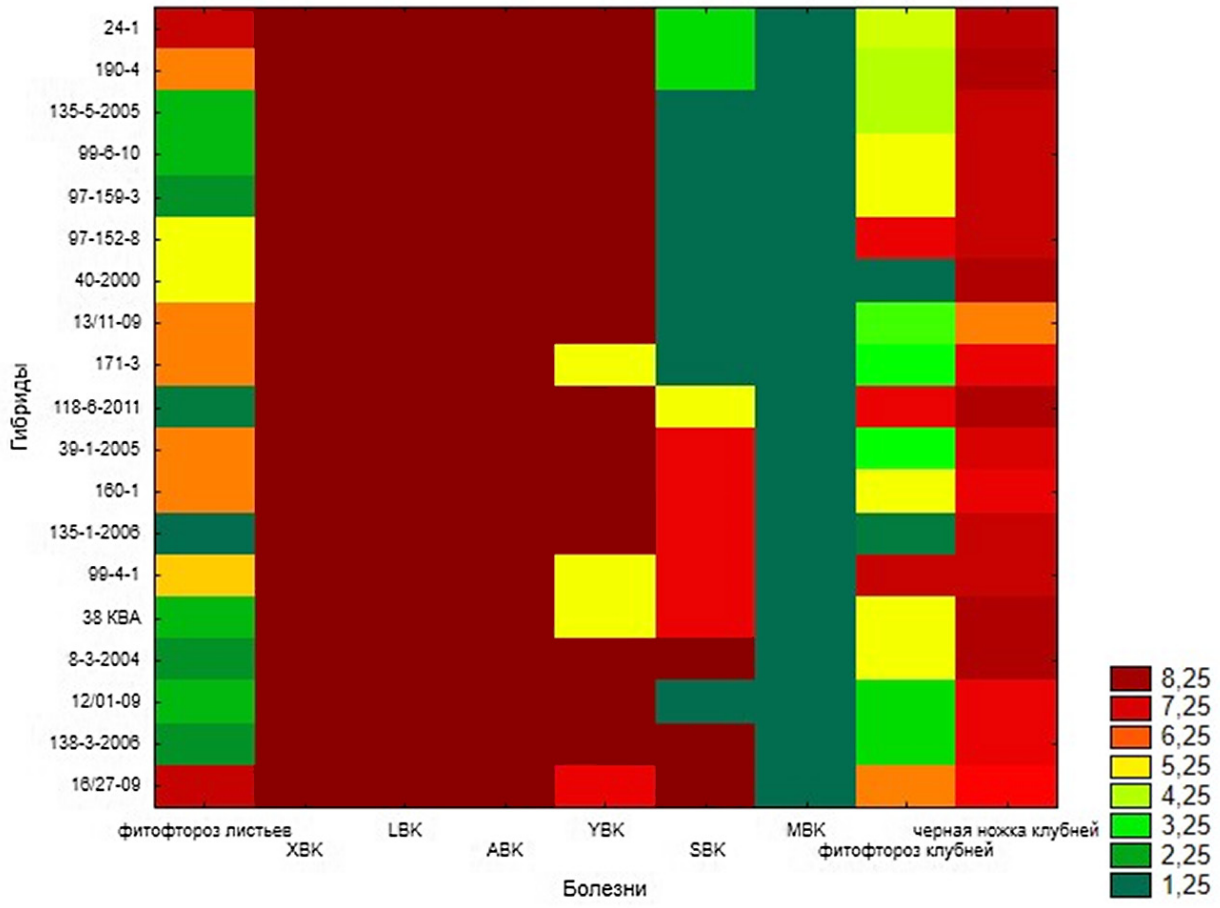


Рис. 4. **Дендрограмма распределения гибридов картофеля на основе групповой устойчивости к болезням**
(устойчивость оценена по шкале 1–9, где 9 – отсутствие поражения)

Fig. 4. **Dendrogram showing distribution of potato hybrids according to their resistance to a group of diseases**
(resistance scores follow the 1–9 scale, where 9 means no damage)

Таблица 5. Характеристика гибридов и сортов картофеля по продуктивности, содержанию крахмала и пригодности к промышленной переработке на картофелепродукты после 5 месяцев хранения, 2021–2023 гг.

Table 5. Characterization of potato hybrids and cultivars for productivity, starch content, and suitability for processing into potato products after 5 months of storage, 2021–2023

Гибрид	Продуктивность, г/куст	Содержание крахмала, %	Пригодность к переработке на картофелепродукты после хранения, балл	Гибрид	Продуктивность, г/куст	Содержание крахмала, %	Пригодность к переработке на картофелепродукты после хранения, балл
24-1	535	14,1	6,0	160-1	1033	14,5	6,0
39-1-2005	795	14,1	6,0	138-3-2006	746	14,6	6,0
135-1-2006	694	16,6	7,0	97-152-8	747	12,9	7,0
99-4-1	559	13,3	7,0	97-159-3	1054	11,8	5,0
8-3-2004	1099	13,2	7,0	40-2000	750	12,0	4,0
135-5-2005	757	13,0	6,0	38 КВА	398	14,9	7,0
12//01-09	851	12,3	3,0	16/27-09	1069	16,9	6,0
13//11-09	562	10,5	3,0	‘Лилея’	740	11,9	6,4
190-4	1054	13,0	6,0	‘Манифест’	967	11,7	7,2
99-6-10	914	12,6	6,0	‘Скарб’	883	9,6	3,8
118-6-2011	487	10,8	7,0	‘Вектар’	848	13,5	5,3
171-3	891	12,3	5,0	‘Здабытак’	630	18,4	6,8

лов) характеризовались гибриды 118-6-2011, 99-4-1, 38 КВА, 97-152-8, 8-3-2004 и 135-1-2006. Средняя пригодность отмечена у образцов 99-6-10, 138-3-2006, 160-1, 190-4, 135-5-2005, 24-1, 39-1-2005 и 16/27-09. Лучшие сорта ‘Манифест’ и ‘Здабытак’ имели оценку 7,2 и 6,8 баллов соответственно.

Молекулярный скрининг выявил у изученных образцов межвидовых гибридов ампликоны маркеров, ассоциированных с двумя локусами углеводного обмена картофеля, – *Stp23* и *Inv-ap-b* (см. табл. 5). У гибридов 171-3, 97-152-8, 160-1, 39-1-2005 и 40-2000 установлено наличие двух маркеров: Stp23-8b и InvGF-4d – одного из двух маркеров, ассоциированных с аллелью гена инвертазы в локусе *Inv-ap-b*. У единственного образца – гибрида 16/27-09 – установлено наличие второго маркера гена – InvGF-4b. У гибридов 97-159-3, 135-1-2006, 118-6-2011 и 12/1-09 установлено наличие маркера Stp23-8b. У гибридов 138-3-2006, 190-4 и 99-6-10 установлено наличие маркера InvGF-4d. У гибридов 24-1, 99-4-1, 8-3-2004, 135-5-2005 и 38 КВА не выявлено ни одного из использованных маркеров. Связи между наличием перечисленных ДНК-маркеров и содержанием крахмала в клубнях гибридов картофеля не обнаружено. Гибриды 16/27-09 и 135-1-2006, у которых выявлено по одному ДНК-маркеру – InvGF-4b и Stp23-8b соответственно, показали наиболее высокое содержание крахмала (16,6–16,9%) среди изученных образцов (см. табл. 5, 6).

Изучение в условиях Республики Беларусь 19 межвидовых гибридов картофеля из коллекции ВИР, отобранных в потомстве разных комбинаций скрещивания с участием диких и культурных видов, сортов и интродуцированных форм картофеля, существенно дополнило их характеристику по устойчивости к болезням. Выделены гибриды – источники устойчивости клубней картофеля к черной ножке и к фитофторозу, что позволяет рекомендовать их для использования в селекции на групповую устойчивость картофеля к фитопатогенам.

Сравнительный анализ данных, полученных при изучении гибридов картофеля в Республике Беларусь, в Московской области (Simakov et al., 2017) и в г. Пушкине (Rogozina et al., 2018), выявил совпадение оценок большинства гибридов по устойчивости к фитофторозу и вирусным болезням. Во всех трех регионах гибриды 24-1, 39-1-2005, 99-4-1, 40-2000 и 171-3 проявляют устойчивость к фитофторозу листьев; гибриды 8-3-2004, 135-5-2005, 118-6-2011, 160-1, 190-4, 97-159-3, 97-152-8, 99-6-10 не поражаются вирусом Y в условиях естественного развития инфекции. Стабильная устойчивость к болезням в разных агроклиматических условиях свидетельствует о надежном генетическом контроле устойчивости к фитопатогенам у выделенных гибридов картофеля. Различия по устойчивости к фитофторозу обнаружены для гибридов 135-5-2005 и 8-3-2004, которые по результатам искусственного заражения листьев и клубней фитофторозом в Федеральном исследовательском центре им. А.Г. Лорха охарактеризованы как устойчивые, а в условия Беларуси – как неустойчивые. Образцы 99-6-10 и 138-3-2006 в условиях Республики Беларусь на естественном инфекционном фоне были устойчивы к L- и Y-вирусу, но поразились данными патогенами в условиях Московской области (Simakov et al., 2017). Очевидно,

Таблица 6. Результаты скрининга межвидовых гибридов картофеля на наличие эффективных аллелей генов, связанных с синтезом углеводов

Table 6. Results of screening interspecific potato hybrids for the presence of loci associated with carbohydrate synthesis

Гибрид	ДНК-маркеры генов синтеза углеводов							
	StpL-3e	StpL-3b	Stp23-8b	AGPsS-10a	AGPsS-9a	InvGF-4d	InvGF-4b	Pain 1-8c
24-1	–	–	–	–	–	–	–	–
39-1-2005	–	–	+	–	–	+	–	–
135-1-2006	–	–	+	–	–	–	–	–
99-4-1	–	–	–	–	–	–	–	–
8-3-2004	–	–	–	–	–	–	–	–
135-5-2005	–	–	–	–	–	–	–	–
12/01-09	–	–	+	–	–	–	–	–
190-4	–	–	–	–	–	+	–	–
99-6-10	–	–	–	–	–	+	–	–
118-6-2011	–	–	+	–	–	–	–	–
171-3	–	–	+	–	–	+	–	–
160-1	–	–	+	–	–	+	–	–
138-3-2006	–	–	–	–	–	+	–	–
97-152-8	–	–	+	–	–	+	–	–
97-159-3	–	–	+	–	–	–	-	–
40-2000	–	–	+	–	–	+	–	–
38 КВА	–	–	–	–	–	–	–	–
16/27-09	–	–	–	–	–	–	+	–

что изменения расового или штаммового состава возбудителей болезней картофеля являются причиной отмеченных различий.

Сравнительный анализ данных изучения хозяйственно ценных признаков у гибридов картофеля в Республике Беларусь, Московской области (Khlopyuk et al., 2021) и Камчатском крае (Ivashchenko et al., 2024) выявил согласованность в характеристиках гибридов 135-1-2006, 99-4-1, 138-3-2006 и 135-5-2005, которые во всех регионах отмечены как среднепродуктивные, уступающие по этому показателю сортам-стандартам. Единственный гибрид 8-3-2004, со средней (750–810 г/куст) продуктивностью в Московской области и Камчатском крае, охарактеризован как высокопродуктивный при выращивании в условиях Республики Беларусь.

Межвидовые гибриды картофеля из коллекции ВИР впервые исследованы на наличие ДНК-маркеров генов, участвующих в углеводном обмене картофеля. Ни у одного из гибридов не обнаружены AGPsS-10a и AGPsS-9a – маркеры эффективных аллелей гена АДФ-глюкозо-пирофосфорилазы *(AGPase*), который является одним из ключевых ферментов биосинтеза крахмала у высших растений (Li et al., 2013). Маркеры генов, отвечающих за деградацию крахмала (фермента фосфорилаза) или вовлеченных в метаболизм сахарозы (фермента кислая вакуолярная инвертаза), также не обнаружены у исследованных гибридов картофеля. В наших опытах не подтвердилась связь между наличием маркера Stp23-8b и повышенным содержанием крахмала в клубнях, ранее обнаруженная у тетраплоидных сортов картофеля (Li et al., 2013). Для скрининга было использовано небольшое число маркеров, что ограничило результативность нашего анализа. Известно, что в метаболизме крахмала картофеля участвуют более восьмидесяти генов, каждый из которых представлен множеством аллельных вариантов. Необходимо продолжение исследований по поиску и валидации ДНК-маркеров генов, участвующих в углеводном обмене картофеля.

В итоге проведенного в условиях Республики Беларусь всестороннего изучения межвидовых гибридов картофеля из коллекции ВИР выделены лучшие образцы, которые включены в гибридизацию для получения новых, перспективных для селекции форм с комплексом хозяйственно ценных признаков. В течение 2021–2024 гг. выполнено 63 комбинации скрещиваний. Ягоды получены в 28 комбинациях. В настоящее время в полевых питомниках проходят изучение 36 новых гибридных форм картофеля.

Заключение

Изучение межвидовых гибридов картофеля, созданных в ВИР, в условиях Республики Беларусь подтвердило высокий уровень устойчивости к фитофторозу и вирусу Y картофеля у гибридов, ранее идентифицированных в качестве источников этих признаков в полевых и лабораторных опытах российских исследователей. Впервые выделены гибриды 190-4 (к-25618), 38 КВА (б. н.) и 118-6-2011 (П-591) с высокой устойчивостью клубней к черной ножке. Выделен гибрид 16/27-09 (к-25628) с высокой продуктивностью и устойчивостью к комплексу болезней – фитофторозу (листьев и клубней) и черной ножке (клубней). Установлено, что гибриды 118-6-2011, 99-4-1 (П-242), 38 КВА, 97-152-8 (П-238), 8-3-2004 (б. н.) и 135-1-2006 (П-264) характеризуются относительно высоким баллом пригодности к промышленной переработке на картофелепродукты после 5 месяцев холодного хранения без рекондиционирования. Выделенные гибриды рекомендуются в качестве источников хозяйственно ценных признаков для селекции.

References / Литература

Andryushina N.A., Batsanov N.S., Budina L.V., Grinevich V.F., Ilyin V.F., Klyukvina Yu.V., Shmyglya V.A., Yashina I.M. Methods of research on the potato crop (Metodika issledovaniy po culture kartofelya). Moscow: VASKhNIL; 1967. [in Russian] (Андрюшина Н.А., Бацанов Н.С., Будина Л.В., Гриневич В.Ф., Ильин В.Ф., Клюквина Ю.В., Шмыгля В.А., Яшина И.М. Методика исследований по культуре картофеля. Москва: ВАСХНИЛ; 1967).

Banadysev S.A., Staravoitov A.M., Kolyadka I.I., Makhanko V.L., Fando V.V., Kozlova L.N., Kolyadka O.M., Azarodova L.V., Goncharova N.N., Vologdina L.N., Stadnikov I.A., Gribko A.P. Guidelines for the specialized assessment of potato cultivars (Metodicheskiye rekomendatsii po spetsializirovannoy otsenke sortov kartofelya). Minsk: Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus; 2003. [in Russian] (Банадысев С.А., Старавойтов А.М., Колядка И.И., Маханько В.Л., Фандо В.В., Козлова Л.Н., Колядка О.М., Незаконова Л.В., Гончарова Н.Н., Вологдина Л.Н., Стадников И.А., Грибко А.П. Методические рекомендации по специализированной оценке сортов картофеля. Минск: Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь; 2003).

Blotskaya J.V. Viral, viroid and phytoplasma diseases of potatoes (Virusnye, viroidnye i fitoplazmennye bolezni kartofelya). Minsk: Technalogia; 2000. [in Russian] (Блоцкая Ж.В. Вирусные, вироидные и фитоплазменные болезни картофеля. Минск: Тэхналогія; 2000).

Bukasov S.M., Zykin A.G., Bavyko N.F., Kostina L.I., Rudenko A.I., Sorokin A.I. Methodological guidelines for the maintenance and study of the world potato collection. S.M. Bukasov (ed.). Leningrad: VIR; 1976. [in Russian] (Букасов С.М., Зыкин А.Г., Бавыко Н.Ф., Костина Л.И., Руденко А.И., Сорокин А.И. Методические указания по поддержанию и изучению мировой коллекции картофеля / под ред. С.М. Букасова. Ленинград: ВИР; 1976).

Busko I.I., Levantsevich I.V., Mihalenya O.N., Mantsevich L.A. Features of late blight during the growing season-2013. *Potato-Growing. Proceedings*. 2014;22:58-62. [in Russian] (Бусько И.И., Леванцевич И.В., Михаленя О.Н., Манцевич Л.А. Особенности проявления фитофтороза картофеля в вегетационный период 2013 года. *Картофелеводство. Сборник научных трудов*. 2014;22:58-62).

Dorozhkin N.A., Ivanyuk V.G. (eds). Methods for assessing potato, vegetable and fruit crops for disease resistance: methodological recommendations (Metody otsenki kartofelya, ovoshchnykh i plodovykh kultur na ustoychivost k boleznyam: metodtcheskiye rekomendatsii). Minsk: Belorussian Research Institute of Potato, Fruit and Vegetable Growing; 1987. [in Russian] (Методы оценки картофеля, овощных и плодовых культур на устойчивость к болезням: методические рекомендации / под ред. Н.А. Дорожкина, В.Г. Иванюка. Минск: Белорусский НИИ картофелеводства и плодоовощеводства; 1987).

Fry W.E. Quantification of general resistance of potato cultivars and fungicide effects for integrated control of late blight. *Phytopathology.* 1978;68(11):1650-1655. DOI: 10.1094/Phyto-68-1650

Ignatov A.N., Panycheva Yu.S., Voronina M.V., Dzhalilov F.S. Potato bacterial pathogens in Russia. *Potato and Vegetables*. 2018;(1):3-7. [in Russian] (Игнатов А.Н., Панычева Ю.С., Воронина М.В., Джалилов Ф.С. Бактериозы картофеля в Российской Федерации. *Картофель и овощи*. 2018;(1):3-7). DOI: 10.25630/PAV.2018.1.17453

Instruction for NUCLEOSORB Type C DNA isolation kits (Instruktsiya na nabory po vydeleniyu DNK "NUKLEOSORB" Tip S): [website]. [in Russian] (Инструкция на наборы по выделению ДНК «НУКЛЕОСОРБ» Тип С: [сайт]). URL: http://primetech.by/index.php?route=module/downloads [дата обращения: 09.03.2021].

Instruction for using the enzyme immunoassay diagnostic kit for the determination of potato viruses (Instruktsiya po ispolzovaniyu immunofermentnogo diagnosticheskogo nabora dlya opredeleniya virusov kartofelya). Moscow; Korenevo; 1993. [in Russian] (Инструкция по использованию иммуноферментного диагностического набора для определения вирусов картофеля. Москва; Коренево; 1993).

Ivanyuk V.G., Banadysev S.A., Zhuromsky G.K. Protection of potatoes from diseases, pests and weeds (Zashchita kartofelya ot bolezney, vrediteley i sornyakov). Minsk; 2005. [in Russian] (Иванюк В.Г., Банадысев С.А., Журомский Г.К. Защита картофеля от болезней, вредителей и сорняков. Минск; 2005).

Ivashchenko A.D., Sherstyukova T.P., Khasbiullina O.I., Rogozina E.V. Breeding value of potato hybrid clones from the VIR collection revealed in the environments of Kamchatka Territory. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(1):51-63. [in Russian] (Иващенко А.Д., Шерстюкова Т.П., Хасбиуллина О.И., Рогозина Е.В. Проявление селекционно ценных признаков у межвидовых гибридов картофеля из коллекции ВИР в условиях Камчатского края. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(1):51-63). DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-51-63

Izrailsky V.P. Bacterial diseases of plants (Bakterialnye bolezni rasteniy). Moscow: Kolos; 1979. [in Russian] (Израильский В.П. Бактериальные болезни растений. Москва: Колос; 1979).

Khlopyuk M.S., Chalaya N.A., Rogozina E.V. Stability of agronomic traits in interspecific hybrid potato clones in the Central Region of European Russia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021;182(4):79-89. [in Russian] (Хлопюк М.С., Чалая Н.А., Рогозина Е.В. Стабильность агрономически ценных признаков у клонов межвидовых гибридов картофеля в условиях Центрального региона европейской территории России. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селек-*

ции. 2021;182(4):79-89). DOI: 10.30901/2227-8834-2021-4-79-89

Kolyadko I., Nezakonova L., Makhan'ko V. The use of accessions from Vavilov Institute in potato breeding program in Belarus. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2007;163:186-192. [in Russian] (Колядко И.И., Незаконова Л.В., Маханько В.В. Использование образцов коллекции Всероссийского института растениеводства им. Н.И. Вавилова (ВИР) в селекции картофеля в Беларуси. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2007;163:186-192).

Kozlov V., Rusetski N., Chashinski A., Ignatova N. The use of genetic resources from potato collection of N.I. Vavilov Institute of Plant Industry in parental line breeding with resistance to virus diseases, late blight and high starch content. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2007;163:179-186. [in Russian] (Козлов В.А., Русецкий Н.В., Чашинский А.В., Игнатова Н.М. Использование генофонда картофеля ВИР в создании исходного материала, устойчивого к вирусным болезням, фитофторозу, с повышенным содержанием крахмала. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2007;163:179-186).

Kozlov V.A., Rogozina E.V. Interspecific potato hybrid clones developed at VIR as sources of valuable traits for potato breeding in Belarus. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2014;175(2):61-72. [in Russian] (Козлов В.А., Рогозина Е.В. Созданные в ВИР межвидовые гибриды картофеля – источники ценных признаков для селекции картофеля в Белоруссии. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2014;175(2):61-72).

Li L., Paulo M.J., Strahwald J., Lübeck J., Hofferbert H.R., Tacke E. et al. Natural DNA variation at candidate loci is associated with potato chip color, tuber starch content, yield and starch yield. *Theoretical and Applied Genetics*. 2008;116(8):1167-1181. DOI: 10.1007/s00122-008-0746-y

Li L., Strahwald J., Hofferbert H.R., Lübeck J., Tacke E., Junghans H. et al. DNA variation at the invertase locus invGE/GF is associated with tuber quality traits in populations of potato breeding clones. *Genetics*. 2005;170(2):813-821. DOI: 10.1534/genetics.104.040006

Li L., Tacke E., Hofferbert H.R., Lübeck J., Strahwald J., Draffehn A.M. et al. Validation of candidate gene markers for marker-assisted selection of potato cultivars with improved tuber quality. *Theoretical and Applied Genetics*. 2013;126(4):1039-1052. DOI: 10.1007/s00122-012-2035-z

Piskun G.I. Priority areas of potato selective breeding in connection with climate change. *Potato Growing*. 2021;29(1):38-43. [in Russian] (Пискун Г.И. Приоритетные направления селекции картофеля в связи с изменением климата. *Картофелеводство*. 2021;29(1):38-43). DOI: 10.47612/0134-9740-2021-29-38-43

Rogozina E.V., Biryukova V.A., Simakov E.A., Zharova V.A., Chalaya N.A., Kuznetsova M.A. et al. Interspecific hybrids as parental lines in anticipatory breeding for potato resistant to disease and pests. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2018;32(1):26-31). [in Russian] (Рогозина Е.В., Бирюкова В.А., Симаков Е.А., Жарова В.А., Чалая Н.А., Кузнецова М.А. и др. Межвидовые гибриды как родительские формы для упреждающей селекции картофеля на устойчивость к болезням и вредителям. *Достижения науки и техники АПК*. 2018;32(1):26-31). DOI: 10.24411/0235-2451-2018-10105

Rudenko A.I., Kovalchuk G.N. Crop arrangement and harvests of potato in the USSR in the context of climate conditions (Razmeshcheniye posevov i urozhay kartofelya v SSSR v svyazi s klimaticheskimi usloviyami). In: S.M. Bukasov (ed.). *Flora of Cultivated Plants. Vol. 9. Potato*. Leningrad: Kolos; 1971. p.417-429. [in Russian] (Руденко А.И., Ковальчук Г.Н. Размещение посевов и урожай картофеля в СССР в связи с климатическими условиями. В кн.: *Культурная Флора СССР. Т. 9. Картофель* / под ред. С.М. Букасова. Ленинград: Колос; 1971. С.417-429).

Schuhmann P. Auswirkungen des Virusbesatzen auf die Höhe des Knollenertrages. *Kartoffelbau.* 1994;45(6):238-241. [in German]

Spaar D., Bykin A., Drüger D., Zakharenko A., Ivanyuk V., Kalenskaya S., Konovalova V., Litun A., Mukhin K., Novozhilov K., Postnikov V., Tarasenko G., Tsygankov V., Shcherbakov G. Potatoes (Kartofel). D. Spaar (ed.). Minsk; 2004. [in Russian] (Шпаар Д., Быкин А., Дрюгер Д., Захаренко А., Иванюк В., Каленская С., Коновалова В., Литун А., Мухин К., Новожилов К., Постников В., Тарасенко Г., Цыганков В., Щербаков Г. Картофель / под ред. Д. Шпаара. Минск; 2004).

Simakov E.A., Zharova V.A., Mityushkin A.V., Biryukova V.A., Rogozina E.V., Kiru S.D. The use of genetic resources to increase the efficiency of potato breeding. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2017;178(2):113-121. [in Russian] (Симаков Е.А., Жарова В.А., Митюшкин А.В., Бирюкова В.А., Рогозина Е.В., Киру С.Д. Использование генетических ресурсов картофеля для повышения эффективности селекции. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2017;178(2):113-121). DOI: 10.30901/2227-8834-2017-2-113-121

Sklyarova N.P., Cherepanova R.V. Guidelines for determining immunity and hypersensitivity of potato breeding material to X and Y viruses and field resistance to viral diseases (Metodicheskiye ukazaniya po opredeleniyu immuniteta i sverkhchuvstvitelnosti selektsionnogo materiala kartofelya k virusam X i Y i polevoy ustoychivosti k virusnym boleznyam). Moscow; Kraskovo: Research Institute of Potato Farming; 1978. [in Russian] (Склярова Н.П., Черепанова Р.В. Методические указания по определению иммунитета и сверхчувствительности селекционного материала картофеля к вирусам Х и У и полевой устойчивости к вирусным болезням. Москва; Красково: НИИ картофельного хозяйства; 1978).

Slater A.T., Cogan N.O.I., Hayes B.J., Schultz L., Dale M.F.B., Bryan G.J. et al. Improving breeding efficiency in potato using molecular and quantitative genetics. *Theoretical and Applied Genetics*. 2014;127(11):2279-2292. DOI: 10.1007/s00122-014-2386-8

Информация об авторах

Анатолий Владимирович Чашинский, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по картофелеводству и плодоовощеводству, 223013 Беларусь, Минская обл., Минский район, Самохваловичи, ул. Ковалева, 2а, a.chashinski@rambler.ru, https://orcid.org/0009-0007-0839-8892

Виктор Алексеевич Козлов, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий лабораторией, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по картофелеводству и плодоовощеводству, 223013 Беларусь, Минская обл., Минский район, Самохваловичи, ул. Ковалева, 2а, wiko@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-4925-5898

Диана Владимировна Башко, научный сотрудник, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по картофелеводству и плодоовощеводству, 223013 Беларусь, Минская обл., Минский район, Самохваловичи, ул. Ковалева, 2а, geneticabelbulba@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-0280-8481

Николай Владимирович Русецкий, кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по картофелеводству и плодоовощеводству, 223013 Беларусь, Минская обл., Минский район, Самохваловичи, ул. Ковалева, 2а, nicrw@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-3290-1801

Инна Александровна Родькина, кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по картофелеводству и плодоовощеводству, 223013 Беларусь, Минская обл., Минский район, Самохваловичи, ул. Ковалева, 2а, rodkina@tut.by, https://orcid.org/0009-0005-7029-8150

Надежда Александровна Чалая, кандидат сельскохозяйственных 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, n.chalaya@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-8515-7941

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

Anatol V. Chashynski, Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor, Leading Researcher, Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Potato, Fruit and Vegetable Growing, 2a Kovaleva St., Samokhvalovichy, Minsk District, Minsk Region 223013, Belarus, a.chashinski@rambler.ru, https://orcid.org/0009-0007-0839-8892

Victor A. Kozlov, Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Head of a Laboratory, Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Potato, Fruit and Vegetable Growing, 2a Kovaleva St., Samokhvalovichy, Minsk District, Minsk Region 223013, Belarus, wiko@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-4925-5898

Diana V. Bashko, Researcher, Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Potato, Fruit and Vegetable Growing, 2a Kovaleva St., Samokhvalovichy, Minsk District, Minsk Region 223013, Belarus, geneticabelbulba@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-0280-8481

Nicolai V. Rusetski, Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Leading Researcher, Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Potato, Fruit and Vegetable Growing, 2a Kovaleva St., Samokhvalovichy, Minsk District, Minsk Region 223013, Belarus, nicrw@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-3290-1801

Inna A. Rodkina, Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Leading Researcher, Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Potato, Fruit and Vegetable Growing, 2a Kovaleva St., Samokhvalovichy, Minsk District, Minsk Region 223013, Belarus, rodkina@tut.by, https://orcid.org/0009-0005-7029-8150

Nadezhda A. Chalaya, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, n.chalaya@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-8515-7941

Elena V. Rogozina, Dr. Sci. (Biology), Leader 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 09.06.2025; одобрена после рецензирования 30.10.2025; принята к публикации 04.02.2026.
The article was submitted on 09.06.2025; approved after reviewing on 30.10.2025; accepted for publication on 04.02.2026.

КОЛЛЕКЦИИ МИРОВЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СЕЛЕКЦИИ

Научная статья
УДК 634.222:631.526.34:631.151.2(470.6)
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o1

CC BY

Изучение перспективных сортов сливы домашней (*Prunus domestica* L.) зарубежной и российской селекции

О. А. Гореликова

Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Крымская опытно-селекционная станция – филиал ВИР, Крымск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Ольга Александровна Гореликова gorelicova.o@yandex.ru

Актуальность. В южных регионах России, где активно развивается промышленное садоводство, особое внимание уделяется исследованиям, направленным на улучшение сортимента сливы домашней. В работе отображены результаты изучения сортов сливы домашней отечественной селекции и интродуцированных сортов зарубежной селекции по комплексу ценных признаков, выделены сорта для выращивания в условиях Краснодарского края.
Материалы и методы. Объектами исследования служили 17 интродуцированных и местных сортов сливы домашней различного срока созревания. Исследования проведены в период с 2019 по 2024 г. в условиях западной подзоны предгорной зоны плодоводства Краснодарского края. Использованы общепринятые программы и методы сортоизучения. Статистическая обработка данных проведена в пакете Statistica 10.0.
Результаты. Дана оценка образцов по комплексу признаков: ранний срок созревания и крупноплодность; поздний срок созревания и крупноплодность; высокая одномерность плодов и урожайность; высокое качество свежих плодов и продуктов переработки; высокая прочность кожицы в свежих плодах. Проведен двухфакторный анализ влияния фактора «год» на крупноплодность и урожайность.
Заключение. В условиях Краснодарского края в ходе исследований отобрано 12 образцов сливы домашней из селекционных учреждений Российской Федерации, США, Украины, Румынии и Сербии по одному или нескольким хозяйственно ценным признакам. За шесть лет исследований сорта ‘Амерс’, ‘Большой Приз’, ‘Геркулес’, ‘Гросса ди Фелисио’, ‘Лидер’, ‘Ненька’, ‘Чачакская Ранняя’ имели плоды массой более 50 г. Все выделенные сорта могут быть использованы в селекционных программах как источники крупноплодности. В зависимости от срока созревания установлено, что наибольшее влияние на крупноплодность оказывает фактор «сорт» – от 64 до 78%, а фактор «год» – от 20 до 34%. Установлена достоверная положительная корреляция между массой плодов и урожайностью (r = 0,67).

***Ключевые слова*:** сорт, слива домашняя, оценка хозяйственно ценных признаков, факторы влияния

Благодарности: работа выполнена в рамках реализации Программы развития Национального центра генетических ресурсов растений по соглашению с Минобрнауки России от 26 февраля 2025 г. № 075-02-2025-1584.

Для цитирования: Гореликова О.А. Изучение перспективных сортов сливы домашней (*Prunus domestica* L.) зарубежной и российской селекции. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(1):88-97. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o1

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, автору и ее/его месту работы.

© Гореликова О.А., 2026

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

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o1

Promising plum (*Prunus domestica* L.) cultivars developed by foreign and domestic breeders: a study in the south of Russia

Olga A. Gorelikova

N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Krymsk Experiment Breeding Station – branch of VIR, Krymsk, Russia

Corresponding author: Olga A. Gorelikova, gorelicova.o@yandex.ru

Background. Active development of industrial horticulture in the southern regions of Russia requires targeted research into the ways to improve cultivated European plum. A study was conducted to evaluate a set of important traits in European plum cultivars developed domestically and introduced from foreign countries. Several genotypes were selected as promising for cultivation under the conditions of Krasnodar Territory.
Materials and methods. The research materials included 17 introduced and local European plum cultivars with different ripening schedules. The study was carried out in the period from 2019 to 2024 in the environments of the western subzone of the foothill horticultural zone, Krasnodar Territory. Conventional programs and techniques were used for cultivar testing, and the Statistica 10.0 software package for statistical data processing.
Results. Plum accessions were evaluated for a set of characteristics: early ripening and large fruit size; late ripening and large fruit size; high uniformity of fruits and yield; high quality of fresh fruits and processed products; high firmness of skin in fresh fruits. The effect of the cultivar and year factors on fruit size and yield was assessed using a two-factor analysis.
Conclusion. Twelve European plum cultivars, developed in Russia, the USA, Ukraine, Romania and Serbia, were selected in Krasnodar Territory for one or several agronomic traits. Over six years of research, cvs. 'Amers', 'Bolshoy Priz', 'Gerkules', 'Grossa di Felicio', 'Lider', 'Nenka', and 'Chachakskaya Rannyaya' yielded fruits weighing more than 50 g. All of them can be included into breeding programs as sources of large fruit size. Depending on the ripening schedule, it was ascertained that the cultivar factor had the greatest effect on the large fruit size trait – from 64 to 78%, and the effect of the year factor varied from 20 to 34%. A statistically significant positive correlation was established between fruit weight and yield (r = 0.67).

Keywords: cultivar, European plum, evaluation of agronomic traits, effect factors

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the Development Program for the National Center for Plant Genetic Resources under the agreement with the Ministry of Science and Higher Education of Russia dated February 26, 2025, No. 075-02-2025-1584.

For citation: Gorelikova O.A. Promising plum (*Prunus domestica* L.) cultivars developed by foreign and domestic breeders: a study in the south of Russia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(1):88-97. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o1

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. The author thanks the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the author or her/his employers.

Введение

Южные регионы России, особенно Северный Кавказ, являются наиболее подходящими для выращивания высококачественной продукции плодовых культур благодаря своим уникальным природно-климатическим условиям. Этот регион – один из ведущих в современном плодоводстве. В промышленных насаждениях здесь выращивают как семечковые, так и косточковые культуры. Особенно хорошо себя чувствует здесь гексаплоидная слива домашняя (*Prunus domestica* L., 2n = 48), для которой подходят все зоны этого региона. Здесь сосредоточено огромное количество разнообразных сортов сливы (Zaremuk, 2013; Radchenko, 2018; Gorelikova, 2024).

Технологии промышленного производства на Северном Кавказе активно развиваются, постепенно внедряются интенсивные методы выращивания сельскохозяйственных культур (Eremin et al., 2016; Reig et al., 2018; Eremin, Gorelikova, 2023). На сегодняшний день в хозяйствах всех форм собственности на территории Краснодарского края площадь плодово-ягодных насаждений составляет 41,6 тыс. гектаров (Bredishchev et al., 2024). В Ставропольском крае этот показатель равен 5 тыс. га, в Республике Ингушетии – 3,7 га, в Карачаево-Черкесской Республике – 610 га, в Чеченской Республике – 2,5 тыс. га, а в Республике Северной Осетии – 3641 га. Из них только шестая часть приходится на сливовые насаждения.

В настоящее время в Северо-Кавказском регионе районировано 27 сортов сливы домашней, выведенных отечественными и зарубежными селекционерами (State register…, 2024). Однако благодаря активному обмену между научными учреждениями и интродукции новых сортов из-за границы генофонд сливы продолжает расширяться. Это позволяет обновлять сортовой состав сливы домашней и обеспечивать непрерывное поступление свежих плодов на прилавки магазинов.

Опытные селекционеры знают, что интродуцированные сорта плодовых культур хорошо адаптируются в условиях юга России, но часто не проявляют признаков и свойств, характерных для их родных мест (Gharbi, 2014; Bilal et al., 2015; Surányi, 2019; Zaremuk, Kochubey, 2021). Поэтому основная *цель исследования* заключается в выделении высокопродуктивных сортов, обладающих комплексом положительных признаков, которые будут адаптированы к условиям региона и пригодны для выращивания с использованием интенсивных технологий. Это остается актуальным на сегодняшний день. Также проведена комплексная оценка сортов-интродуцентов в сравнении с перспективными сортами местной селекции.

Материалы и методы

Исследования проводились в насаждениях сливы домашней на Крымской опытно-селекционной станции (ОСС) – филиале Федерального исследовательского центра Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР) в условиях западной подзоны предгорной зоны плодоводства Краснодарского края. Участок, выбранный для эксперимента, представляет ровную площадку, с небольшим уклоном. Количество деревьев каждого сорта – 60 шт. Деревья посажены по схеме 5 × 3 м, что составляет 666 шт. на гектар; обрезка деревьев щадящая, по технологии «бордюр». Год и месяц закладки сада – декабрь 2015 г. Объектами исследования стали 6 интродуцированных сортов сливы домашней, имеющих разное эколого-географическое происхождение: США – ‘Амерс’, ‘Геркулес’, ‘Гросса ди Фелисио’; Украина – ‘Ненька’; Румыния – ‘Сильвия’; Сербия – ‘Чачакская Ранняя’; и 8 сортов, выведенных на Крымской опытно-селекционной станции ВИР: ‘Баллада’, ‘Беглянка’, ‘Большой Приз’, ‘Голубая Мечта’, ‘Дебют’, ‘Лидер’, ‘Наследница’, ‘Престиж’ (табл. 1). В качестве контроля использовались сорта: ‘Кубанская Ранняя’ – раннего; ‘Кубанская Юбилейная’ – среднего; ‘Стенлей’ – позднего срока созревания. Все сорта привиты на низкорослый клоновый подвой ВВА 1.

В рамках исследований фенологических фаз, плодоношения, формирования урожая, а также качества плодов, устойчивости сортов к болезням и вредителям проведены наблюдения и учет в соответствии с общепринятыми методиками изучения и селекции плодовых, ягодных и орехоплодных культур (Sedov, Ogoltsova, 1999; Egorov, 2013).

Для определения содержания сахаров в процентах и прочности кожицы плодов (SHORE A 1–100 единиц) использовались портативные рефрактометр для фруктов и винограда 53000 C Manual и плотномер Fruit Hardness Tester.

Различия образцов по крупноплодности и урожайности оценивали методом дисперсионного анализа по F-критерию Фишера для 5-процентного уровня значимости (Dospekhov, 1985). Статистическую обработку данных проводили с помощью дисперсионного анализа с использованием компьютерных программ Microsoft Excel-97 и Statistica 10.0. Оценку свежих плодов осуществляли в соответствии с ГОСТ 32286-2013 (GOST 32286-2013…, 2014).

Результаты и обсуждение

Одним из важных этапов нашей работы стало изучение перспективных интродуцированных сортов сливы и их сравнение по хозяйственно ценным признакам с сортами, полученными в результате селекции на Крымской опытно-селекционной станции ВИР. Исследования проводились в течение шести лет – с 2019 по 2024 г. на юге Краснодарского края. В первые три года саженцы получали капельное орошение, что способствовало их быстрому росту и хорошему развитию. Ежегодно ранней весной проводили двукратное опрыскивание медьсодержащими препаратами для защиты от болезней. Все сорта сливы домашней были привиты на низкорослый клоновый подвой ВВА 1, что обеспечило быстрое вступление в плодоношение. Уже на четвертый год растения дали свой первый урожай.

Согласно данным Крымской метеостанции, в течение последних 15 лет среднегодовая температура воздуха каждый год превышает климатическую норму. В целом мягкие зимы и теплая весна без существенных возвратных заморозков создали идеальные условия для обильного цветения и получения хорошего урожая.

Как показывают исследования, растения особенно чувствительны к температурным колебаниям в период цветения, вегетации и формирования плодов (Yoon et al., 2021; Radchenko, Novikova, 2023). Анализ фенологических наблюдений показал, что в среднем цветение исследуемых образцов происходит с 8 по 16 апреля. Однако самое позднее начало цветения было зафиксировано в 2021 г. с 16 по 26 апреля (табл. 2).

В 2024 г. сроки цветения сместились на конец марта, и начало цветения было отмечено 31 числа у сортов ‘Баллада’, ‘Геркулес’, ‘Гросса ди Фелисио’, ‘Наследница’

Таблица 1. Происхождение изученных образцов сливы домашней коллекции ВИР
Table 1. Origin of the studied European plum accessions from the VIR collection

№ по каталогу ВИР	Название образца	Происхождение
Образцы из Российской Федерации		
28536	‘Кубанская Ранняя’	‘Анна Шпет’ с. о.* (Крымск)
43904	‘Баллада’	‘Кабардинская Ранняя’ × ‘Юбилейная Сочинская’ (Крымск)
43908	‘Беглянка’	‘Ренклод Альтана’ × ‘Горкуша’ (Крымск)
43933	‘Дебют’	‘Кабардинская Ранняя’ × Элита 2-21-32 (Крымск)
45392	‘Большой Приз’	‘Кабардинская ранняя’ × ‘Соперница’ (Крымск)
45394	‘Голубая Мечта’	‘Стенлей’ × ‘Сентябрьская’ (Крымск)
45395	‘Кубанская Юбилейная’	‘Альвена’ × ‘Зайнап’ (Крымск)
45398	‘Лидер’	‘Кабардинская Ранняя’ с. о. (Крымск)
45400	‘Престиж’	‘Ренклод Альтана’ × ‘Юбилейная Сочинская’ (Крымск)
49670	‘Наследница’	‘Стенлей’ с. о. (Крымск)
Образцы из зарубежных стран		
43926	‘Геркулес’	Неизвестно, сорт завезен из США
43946	‘Гросса ди Фелисио’	Неизвестно, сорт завезен из США
44058	‘Ненька’	Сорт украинской селекции
44091	‘Сильвия’	‘Ренклод Альтана’ ×’ Ранняя Риверса’ (Румыния)
44097	‘Стенлей’	‘Венгерка Ажанская’ × ‘Великий Герцог’ (США)
45703	‘Амерс’	‘Стандарт’ × ‘Стенлей’ (США)
49626	‘Чачакская Ранняя’	‘Венгерка Обыкновенная’ × ‘Венгерка Вангенгейма’ (Сербия)

Примечание: * – с. о. – свободное опыление
Note: * – с. о. – open pollination

и ‘Ненька’. Продолжительность цветения образцов варьировала от 6 до 10 дней.

В результате исследований все сорта были ранжированы на три группы по срокам созревания: I – ранние: ‘Дебют’, ‘Лидер’, ‘Ненька’, ‘Сильвия’, ‘Чачакская Ранняя’; II – средние: ‘Амерс’, ‘Баллада’, ‘Беглянка’, ‘Большой Приз’, ‘Наследница’, ‘Престиж’; III – поздние: ‘Геркулес’, ‘Голубая Мечта’, ‘Гросса ди Фелисио’.

Согласно средним многолетним данным, представленным в таблице 2 за период с 2022 по 2024 г., в первой группе отмечалось смещение сроков созревания от 4 до 7 дней. Наиболее значительное отклонение наблюдали у сорта ‘Ненька’ – 13 дней. Этот сорт созрел самым первым 9 июля. Средние сроки созревания II группы остались на уровне среднемноголетних данных и зафиксированы с 8 по 18 августа. Последним из III группы позднего срока созревания поспел сорт ‘Геркулес’ – 10 сентября.

Анализ результатов оценки сортов показал, что все они имели крупные плоды. В таблице 3 представлены вариации по годам средней массы плодов от 35,0 г (сорт ‘Баллада’) до 72,2 г (сорт ‘Гросса ди Фелисио’). За годы исследований выявлены сорта с очень крупными плодами: ‘Амерс’ (63,5 г), ‘Лидер’ (67,0 г), ‘Чачакская Ранняя’ (75,7 г), ‘Геркулес’ (76,4 г), ‘Ненька’ (77,0 г), ‘Гросса ди Фелисио’ (82,8 г). Эти сорта могут стать ценными источниками крупноплодности при включении их в селекционные программы.

Для определения факторов, влияющих на массу плодов, провели двухфакторный анализ. Основной фактор влияния – фактор «сорт». Генетические особенности оказывают наибольшее воздействие на показатель крупноплодности – от 64% до 78%. Особенно заметно влияние фактора «сорт» у ранних сортов (F фактическое = 3,27 при стандартном значении Фишера $F_{ст.}$ = 2,5) и поздних сортов (F фактическое = 3,64 при стандартном значении Фишера $F_{ст.}$ = 2,6). Погодные условия, или фактор «год», также влияют на массу плодов, при этом составляя от 20% до 34%. И лишь 2% приходится на случайные факторы, такие как обрезка, обработка деревьев препаратами и другие.

В течение шести лет исследований наибольшая продуктивность, превышающая 10,0 кг с дерева, отмечалась у сортов, созревающих в разные сроки: ‘Амерс’ (11,0 кг/дер.), ‘Чачакская Ранняя’ (11,5 кг/дер.), ‘Беглянка’’ (12,0 кг/дер.), ‘Сильвия’ (12,0 кг/дер.), ‘Дебют’ (12,5 кг/дер.), ‘Гросса ди Фелисио’ (14,0 кг/дер.), ‘Голубая Мечта’ (17,0 кг/дер.). Однако в первую группу, превосходящую контрольные сорта, согласно критерию $НСР_{05}$, вошли только образцы: ‘Большой Приз’ (3,6 т/га), ‘Ненька’ (4,3 т/га), ‘Амерс’ (4,3 т/га), ‘Геркулес’ (4,5 т/га), ‘Бег-

Таблица 2. Фенологические наблюдения сливы домашней
(Крымская опытно-селекционная станция ВИР, 2019–2024 гг.)

Table 2. Phenological observations of European plum
(Krymsk Experiment Breeding Station of VIR, 2019–2024)

Сорт	Начало цветения		Дата съемной спелости	
	2019–2021 гг.	2022–2024 гг.	2019–2021 гг.	2022–2024 гг.
раннего срока созревания				
‘Дебют’	14.04 ± 8	9.04 ± 5	23.07 ± 3	19.07 ± 7
‘Лидер’	14.04 ± 7	5.04 ± 3	24.07 ± 1	17.07 ± 5
‘Ненька’	9.04 ± 6	4.04 ± 4	29.07 ± 4	16.07 ± 7
‘Сильвия’	10.04 ± 6	7.04 ± 3	1.08 ± 3	25.07 ± 4
‘Чачакская Ранняя’	10.04 ± 6	7.04 ± 3	20.07 ± 3	13.07 ± 3
‘Кубанская Ранняя’ (к)	8.04 ± 6	6.04 ± 3	23.07 ± 2	16.07 ± 4
среднего срока созревания				
‘Амерс’	11.04 ± 6	9.04 ± 4	17.08 ± 1	18.08 ± 4
‘‘Баллада’	10.04 ± 7	5.04 ± 5	19.08 ± 5	15.08 ± 4
‘‘Беглянка’	14.04 ± 8	7.04 ± 5	16.08 ± 3	13.08 ± 2
‘‘Большой Приз’	16.04 ± 8	9.04 ± 4	19.08 ± 5	15.08 ± 1
‘Наследница’	12.04 ± 6	5.04 ± 5	16.08 ± 6	10.08 ± 7
‘Престиж’	14.04 ± 8	8.04 ± 2	18.08 ± 5	13.08 ± 3
‘Кубанская Юбилейная’ (к)	14.04 ± 8	7.04 ± 4	13.08 ± 4	8.08 ± 5
позднего срока созревания				
‘Геркулес’	15.04±7	5.04±5	3.09 ± 7	4.09 ± 5
‘Голубая Мечта’	14.04±7	8.04±5	25.08 ± 2	24.08 ± 2
‘Гросса ди Фелисио’	15.04±8	5.04±4	1.09 ± 5	31.08 ± 3
‘Стенлей’ (к)	12.04±7	8.04±3	30.08 ± 4	24.08 ± 3

Примечание: (к) – контроль

Note: (к) – control

лянка’ (4,9 т/га), ‘Гросса ди Фелисио’ (5,0 т/га), ‘Голубая Мечта’ (5,3 т/га). В результате двухфакторного анализа не выявлено существенных различий по урожайности между группами, отличающимися по срокам созревания ($F_{ф.} < F_{ст.}$). Данные представлены в таблице 3. Установлена достоверная положительная корреляция между массой плода и урожаем (r = 0,67) при n = 17.

На рисунке 1 представлены расчеты коэффициентов вариации по признаку крупноплодности. Выявлены сорта с наименьшей изменчивостью этого признака: ‘Голубая Мечта’ (4,7%), ‘Большой Приз’ (6,5%), ‘Баллада’ (7,2%), ‘Лидер’ (7,7%), ‘Наследница’ (9,3%) и ‘Геркулес’ (9,8%). Это свидетельствует о том, что плоды этих сортов обладают высокой однородностью. Наибольший разброс размеров плодов был зафиксирован у сорта ‘Дебют’ с коэффициентом вариации 23,1%.

В ходе исследований выявлено, что большинство сортов раннего и среднего срока созревания демонстрируют значительную изменчивость урожайности. На рисунке 2 представлен расчет коэффициента вариации, отражающий эту изменчивость; пределы колебания – от 20,3% у сорта ‘Сильвия’ до 30,0% у сорта ‘Баллада’ (см. рис. 2). Лишь в группе позднего срока созревания все образцы имели среднюю изменчивость этого признака – от 15,1 до 19,4%. Наименьший коэффициент вариации зафиксирован у сорта среднего срока созревания ‘Наследница’ – 12,1%.

Одним из ключевых аспектов характеристики сорта является качество плодов свежей продукции. Сорта, получившие высокие вкусовые оценки, отличаются повышенным содержанием сахара в плодах: ‘Ненька’ (4,8 балла, 17,4%), ‘Чачакская Ранняя’ (4,9 балла, 18,0%), ‘Наследница’ (4,7 балла, 14,5%), ‘Голубая Мечта’ (4,6 балла, 15,2%), ‘Гросса ди Фелисио’ (4,6 балла, 16,8%). Данные представлены в таблице 4.

Сорта сливы домашней среднего и позднего сроков созревания были заложены в холодильную камеру, с температурой воздуха +3°С. Через месяц хранения вкусовые качества у всех сортов изменились незначительно – на 0,1–0,2 балла. Лишь один сорт ‘Наследница’ не претерпел

Таблица 3. Продуктивность сортов сливы домашней
(Крымская опытно-селекционная станция ВИР, 2019–2024 гг.)

Table 3. Productivity of European plum cultivars
(Krymsk Experiment Breeding Station of VIR, 2019–2024)

Сорт (фактор А)	Масса плода, г			Продуктивность, кг/дер.			Урожайность, т/га
	2019–2021 гг.	2022–2024 гг.	среднее по А	2019–2021 гг.	2022–2024 гг.	среднее по А	
	фактор В			фактор В			
раннего срока созревания							
‘Дебют’	44,5	41,5	43,0	5,5	3,2	4,2	2,8
‘Лидер’	59,6	58,8	59,2	5,0	4,5	4,7	3,1
‘Ненька’	57,7	70,8	64,3	7,5	5,4	6,5	4,3
‘Сильвия’	45,3	53,0	44,2	2,6	7,0	4,8	3,2
‘Чачакская Ранняя’	57,0	64,4	60,7	3,4	4,8	4,1	2,7
‘Кубанская Ранняя’ (к)	44,3	43,6	44,0	3,8	4,0	4,5	3,0
*$НСР_{05}$	4,7	7,3	5,6	1,1	0,8	0,6	0,4
**$НСР_{05}$ факторов	A – 0,97 < F_{05} – 4,5; **B – 3,27 > F_{05} –2,5**			A –1,07 < F_{05} – 2,5; B – 1,51 < F_{05} – 2,5			
среднего срока созревания							
‘Амерс’	51,7	50,6	51,2	5,5	7,2	6,5	4,3
‘Баллада’	33,8	36,0	35,0	2,5	5,8	4,2	2,8
‘Беглянка’	46,0	48,0	46,5	7,9	6,7	7,3	4,9
‘Большой Приз’	52,0	57,9	55,0	7,3	3,5	5,4	3,6
‘‘Наследница’	44,6	40,5	42,6	3,2	5,2	4,2	2,8
‘Престиж’	52,8	44,1	48,5	3,7	4,8	4,3	2,9
‘Кубанская Юбилейная’ (к)	47,1	65,2	56,2	3,6	3,5	4,0	2,7
*$НСР_{05}$	3,8	5,8	4,3	1,2	0,8	0,7	0,3
**$НСР_{05}$ факторов	A – 1,27 < F_{05} – 2,3; B – 0,48 < F_{05} – 4,5			A – 1,03 < F_{05} – 2,3; B – 0,89 < F_{05} – 4,5			
позднего срока созревания							
‘Геркулес’	67,9	68,8	68,4	5,7	7,8	6,8	4,5
‘Голубая Мечта’	35,0	34,2	34,6	12,2	3,8	8,0	5,3
‘Гросса ди Фелисио’	70,4	74,0	72,2	6,2	8,7	7,5	5,0
‘Стенлей’ (к)	40,4	32,2	36,3	6,1	4,7	5,4	3,6
*$НСР_{05}$	15,0	18,1	16,5	2,5	1,9	0,9	0,6
**$НСР_{05}$ факторов	A – 0,06 < F_{05} – 8,7; **B – 3,64 > F_{05} – 2,6**			A – 0,76 < F_{05} – 8,7; B – 0,58 < F_{05} – 2,3			

Примечание: (к) – контроль; *$НСР_{05}$ – наименьшая существенная разность в однофакторной интерпретации; **$НСР_{05}$ – наименьшая существенная разность в двухфакторной интерпретации

Note: (к) – control; *$НСР_{05*}$ is the least significant difference in one-factor interpretation; **$НСР_{05}$ is the least significant difference in two-factor interpretation

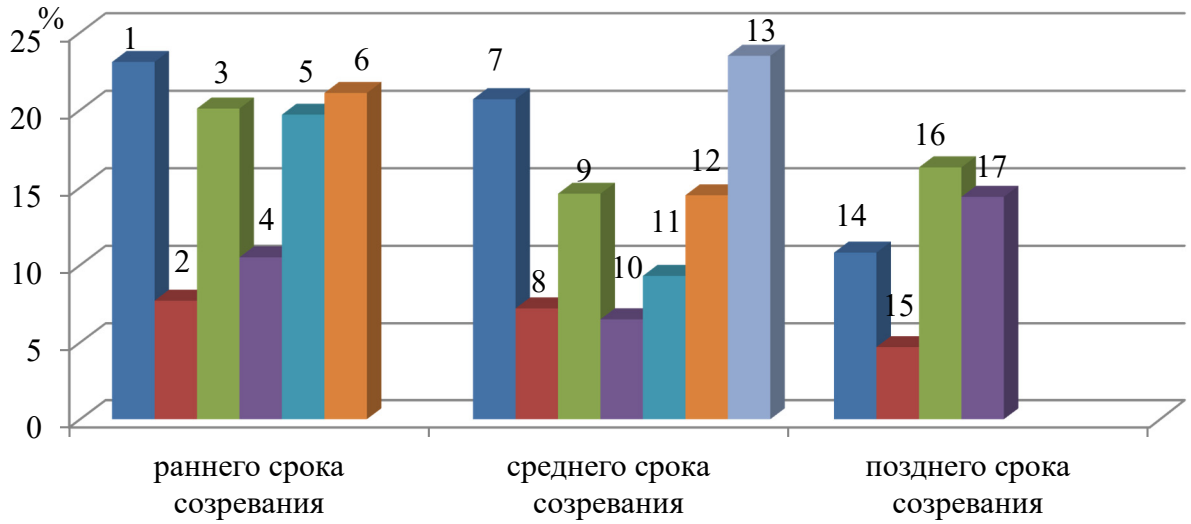


Рис. 1. Коэффициент вариации (V) по признаку крупноплодности сливы домашней:
1 – ‘Дебют’; **2** – ‘Лидер’; **3** – ‘Ненька’; **4** – ‘Сильвия’; **5** – ‘Чачакская Ранняя’; **6** – ‘Кубанская Ранняя’ (контроль для ранних сортов); **7** – ‘Амерс’; **8** – ‘Баллада’; **9** – ‘Беглянка’; **10** – ‘Большой Приз’; **11** – ‘Наследница’; **12** – ‘Престиж’; **13** – ‘Кубанская Юбилейная’ (контроль для средних сортов); **14** – ‘Геркулес’; **15** – ‘Голубая Мечта’; **16** – ‘Гросса ди Фелисио’; **17** – ‘Стенлей’ (контроль для поздних сортов)

Fig. 1. Variation coefficients (V) for large fruit size:
1 – ‘Debyut’; **2** – ‘Lider’; **3** – ‘Nenka’; **4** – ‘Silvia’; **5** – ‘Chachakskaya Rannyaya’; **6** – ‘Kubanskaya Rannyaya’ (control for early cultivars); **7** – ‘Amers’; **8** – ‘Ballada’; **9** – ‘Beglyanka’; **10** – ‘Bolshoy Priz’; **11** – ‘Naslednitsa’; **12** – ‘Prestizh’; **13** – ‘Kubanskaya Yubileynaya’ (control for intermediate cultivars); **14** – ‘Gerkules’; **15** – ‘Golubaya Mechta’; **16** – ‘Grossa di Felicio’; **17** – ‘Stanley’ (control for late cultivars)

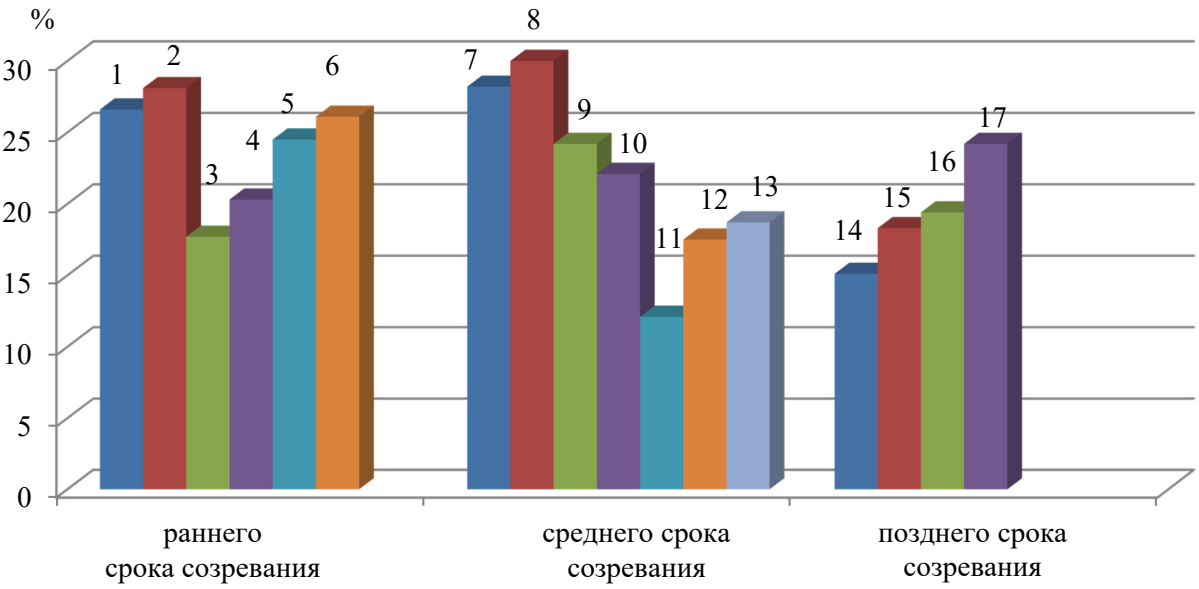


Рис. 2. Коэффициент вариации (V) по признаку урожайности сливы домашней:
1 – ‘Дебют’; **2** – ‘Лидер’; **3** – ‘Ненька’; **4** – ‘Сильвия’; **5** – ‘Чачакская Ранняя’; **6** – ‘Кубанская Ранняя’ (контроль для ранних сортов); **7** – ‘Амерс’; **8** – ‘Баллада’; **9** – ‘Беглянка’; **10** – ‘Большой Приз’; **11** – ‘Наследница’; **12** – ‘Престиж’; **13** – ‘Кубанская Юбилейная’ (контроль для средних сортов); **14** – ‘Геркулес’; **15** – ‘Голубая Мечта’; **16** – ‘Гросса ди Фелисио’; **17** – ‘Стенлей’ (контроль для поздних сортов)

Fig. 2. Variation coefficients (V) for yield:
1 – ‘Debyut’; **2** – ‘Lider’; **3** – ‘Nenka’; **4** – ‘Silvia’; **5** – ‘Chachakskaya Rannyaya’; **6** – ‘Kubanskaya Rannyaya’ (control for early cultivars); **7** – ‘Amers’; **8** – ‘Ballada’; **9** – ‘Beglyanka’; **10** – ‘Bolshoy Priz’; **11** – ‘Naslednitsa’; **12** – ‘Prestizh’; **13** – ‘Kubanskaya Yubileynaya’ (control for intermediate cultivars); **14** – ‘Gerkules’; **15** – ‘Golubaya Mechta’; **16** – ‘Grossa di Felicio’; **17** – ‘Stanley’ (control for late cultivars)

Таблица 4. Качество плодов сливы домашней
(Крымская опытно-селекционная станция ВИР, 2019–2024 гг.)

Table 4. Fruit quality of European plum
(Krymsk Experiment Breeding Station of VIR, 2019–2024)

Сорт	Оценка, балл			Свежие плоды	
	свежие плоды	свежие плоды после месяца хранения	сухофрукты	сахара, %	прочность кожицы, SHORE A 1–100 ед.
раннего срока созревания					
‘Дебют’’	4,3	-	4,0	13,5	83,0
‘Лидер’	4,6	-	4,4	12,8	88,2
‘Ненька’	4,8	-	4,5	17,4	76,6
‘Сильвия’	4,4	-	4,7	15,2	90,0
‘Чачакская Ранняя’	4,9	-	4,5	18,0	80,6
‘Кубанская Ранняя’ (к)	4,4	-	4,1	10,4	82,0
$НСР_{05}$	0,2	-	0,2	1,8	3,1
среднего срока созревания					
‘Амерс’	4,5	4,4	4,5	9,8	102,4
‘Баллада’	4,4	4,4	4,7	10,6	96,6
‘Беглянка’	4,0	3,8	4,2	8,2	85,2
‘Большой Приз’	4,5	4,4	4,4	13,2	95,8
‘Наследница’	4,7	4,7	4,8	14,5	96,8
‘Престиж’	4,5	4,3	4,6	13,2	92,0
‘Кубанская Юбилейная’ (к)	4,6	4,4	4,6	13,0	91,2
$НСР_{05}$	0,1	0,2	0,1	1,3	2,5
позднего срока созревания					
‘Геркулес’	4,5	4,4	4,7	14,6	107,8
‘Голубая Мечта’	4,6	4,4	4,8	15,2	94,0
‘Гросса ди Фелисио’	4,6	4,5	4,8	16,8	108,2
‘Стенлей’ (к)	4,5	4,4	4,7	13,2	98,6
$НСР_{05}$	0,1	0,1	0,1	0,4	0,6

Примечание: (к) – контроль; $НСР_{05}$ – наименьшая существенная разность

Note: (к) – control; $НСР_{05}$ is the least significant difference

изменений – 4,7 балла до и после хранения. После переработки свежих слив и получения сухофруктов были отобраны сорта, которые, согласно критерию $НСР_{05}$, превзошли контроль по своим дегустационным качествам, получив высокие оценки в диапазоне 4,7–4,8 баллов. К таким сортам относятся: ‘Баллада’, ‘Геркулес’, ‘Голубая Мечта’, ‘Гросса ди Фелисио’, ‘Наследница’, ‘Сильвия’.

С помощью портативного плотномера измерили прочность кожицы плодов (от 1 до 100 единиц по шкале SHORE A). Плоды с высокой плотностью, превышающей 95,0 единиц, отличаются хорошей транспортабельностью и могут храниться в холодильных камерах более одного месяца. На основе статистического анализа ($НСР_{05}$) выделены сорта, плотность кожицы которых значительно отличается от стандартных сортов. К таким сортам относятся: ‘Большой Приз’ (95,8 ед.), ‘Баллада’ (96,6 ед.), ‘Наследница’ (96,8 ед.), ‘Амерс’ (102,4 ед.), ‘Геркулес’ (107,8 ед.), ‘Гросса ди Фелисио’ (108,2 ед.).

В ходе многолетних исследований изучалось, насколько плоды поражаются плодовой гнилью. В среднем у всех сортов этот показатель составлял от 0 до 2 баллов (незначительное поражение, до 10% поверхности плода). Только у сорта ‘Беглянка’ выявлены сильные поражения: в 2020 г. – 4 балла, в 2024 г. – 5 баллов.

Заключение

В ходе исследований, проведенных на Крымской опытно-селекционной станции ВИР, изучены как интродуцированные сорта, так и местные. В результате выявлены наиболее перспективные из них по комплексу признаков:

– ранний срок созревания (I–II декады июля) и крупноплодность (> 50,0 г): ‘Лидер’, ‘Ненька’, ‘Чачакская Ранняя’;

– поздний срок созревания (I декада сентября) и крупноплодность (> 50,0 г): ‘Геркулес’, ‘Гросса ди Фелисио’;

– высокая одномерность плодов (коэффициент изменчивости < 10): ‘Голубая Мечта’, ‘Большой Приз’, ‘Баллада’, ‘Лидер’, ‘Наследница’, ‘Геркулес’;

– урожайность (≥ 4,0 т/га): ‘Ненька’, ‘Амерс’, ‘Геркулес’, ‘Беглянка’, ‘Гросса ди Фелисио’, ‘Голубая Мечта’;

– высокое качество свежих плодов (оценка вкуса > 4,8 балла, сахара > 14,0%): ‘Ненька’, ‘Чачакская Ранняя’, ‘Наследница’, ‘Голубая Мечта’, ‘Гросса ди Фелисио’;

– высокое качество продуктов переработки (сухофрукты – оценка вкуса > 4,7 балла): ‘Баллада’, ‘Геркулес’, ‘Голубая Мечта’, ‘Гросса ди Фелисио’, ‘Наследница’, ‘Сильвия’;

– высокая прочность кожицы в плодах (> 95,0 ед.): ‘Большой Приз’, ‘Баллада’, ‘Наследница’, ‘Амерс’, ‘Геркулес’, ‘Гросса ди Фелисио’.

Наибольшее влияние на крупноплодность оказывают такие факторы, как сорт (от 64 до 78%) и год (от 20 до 34%). Выявлена достоверная положительная корреляция между массой плода и урожаем ($r = 0,67$; при $n = 17$).

Анализ многолетних данных показал, что независимо от погодных условий стабильно плодоносят как интродуцированные сорта сливы, такие как ‘Амерс’, ‘Геркулес’, ‘Гросса ди Фелисио’ и ‘Сильвия’, так и сорта местной селекции: ‘Большой Приз’, ‘Наследница’ и ‘Престиж’. За шесть лет исследований сорта ‘Лидер’, ‘Ненька’, ‘Чачакская Ранняя’, ‘Амерс’, ‘Большой Приз’, ‘Геркулес’, ‘Гросса ди Фелисио’ обладали очень крупными плодами с массой более 50 г.

Выделенные сорта сливы домашней подходят для дальнейших селекционных программ, промышленного выращивания и обновления ассортимента сливы домашней.

References / Литература

Bilal W., Bhutta M.S., Rehman K.U., Ahmad N., Awan A.A., Hussain B. et al. Physical and chemical attributes of various cultivars of Plum fruit. *Pure and Applied Biology*. 2015;4(3):353-361. DOI: 10.19045/bspab.2015.43011

Bredishchev A.O., Butko M.V., Vykhristova I.D., Ignatyeva E.O., Khilko E.N. (eds). Krasnodar Territory in numbers: Statistical collection. (Krasnodarskiy kray v tsifrakh: Statisticheskiy sbornik). Krasnodar; 2024. [in Russian] (Краснодарский край в цифрах: Статистический сборник / под ред. А.О. Бредищева, М.В. Бутко, И.Д. Выхристовой, Е.О. Игнатьевой, Е.Н. Хилько. Краснодар; 2024).

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).

Egorov E.A. (ed.). The program of the North Caucasus Center for the Breeding of Fruit, Berry, Flower and Ornamental Crops and Grapes for the period until 2030 (Programma Severo-Kavkazskogo tsentra po selektsii plodovykh, yagodnykh, tsvetochno-dekorativnykh kultur i vinograda na period do 2030 goda). Krasnodar; 2013. [in Russian] (Программа Северо-Кавказского центра по селекции плодовых, ягодных, цветочно-декоративных культур и винограда на период до 2030 года / под ред. Е.А. Егорова. Краснодар; 2013).

Eremin G.V., Dubravina I.V., Kovalenko N.N., Gasanova T.A. Prebreeding of fruit crops: a monograph (Predvaritelnaya selektsiya plodovykh kultur: monografiya). G.V. Eremin (ed.). 2nd ed. Krasnodar: Kuban State Agrarian University; 2016. [in Russian] (Еремин Г.В., Дубравина И.В., Коваленко Н.Н., Гасанова Т.А. Предварительная селекция плодовых культур: монография / под ред. Г.В. Еремина. 2-е изд. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет; 2016).

Eremin G.V., Gorelikova O.A. Technology of accelerated plum breeding (*Prunus domestica* L.). *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*. 2023;(106):226-231. [in Russian] (Еремин Г.В., Гореликова О.А. Технология ускоренного выведения сортов сливы домашней (*Prunus domestica* L.). *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2023;(106):226-231). DOI: 10.21515/1999-1703-106-226-231

Gharbi O., Wünsch A., Rodrigo J. Characterization of accessions of ‘Reine Claude Verte’ plum using *Prunus* SRR and phenotypic traits. *Scientia Horticulturae*. 2014;169:57-65. DOI: 10.1016/j.scienta.2014.02.018

Gorelikova O.A. Introduced domestic plum varieties assessment for cultivation in the Krasnodar Territory. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*. 2024;(110):101-108. [in Russian] (Гореликова О.А. Оценка сортов-интродуцентов сливы домашней для выращивания в условиях Краснодарского края. *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2024;(110):101-108). DOI: 10.21515/1999-1703-110-101-108

GOST 32286-2013 (UNECE STANDARD FFV-29:2013). Interstate standard. Plums for retail. Specifications. Moscow: Standartinform; 2014. [in Russian] (ГОСТ 32286-2013 (UNECE STANDARD FFV-29:2013). Межгосударственный стандарт. Сливы, реализуемые в розничной торговле. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2014). URL: https://meganorm.ru/Data2/1/4293774/4293774503.pdf [дата обращения: 19.03.2025].

Radchenko O.E. Resistance of European plum to major biotic and abiotic factors in the North-West of Russia (Ustoychivost slivy domashney k osnovnym bioticheskim i abioticheskim faktoram na Severo-Zapade Rossii). In: *Scientific Support for the Development of the Agro-Industrial Complex in the Context of Import Substitution: a collection of scientific papers. Part I (Nauchnoye obespecheniye razvitiya APK v usloviyakh importozameshcheniya: sbornik nauchnykh trudov. Chast I).* St. Petersburg; 2018. p.163-168. [in Russian] (Радченко О.Е. Устойчивость сливы домашней к основным биотическим и абиотическим факторам на Северо-Западе России. В кн.: *Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения: сборник научных трудов. Часть I.* Санкт-Петербург; 2018. С.163-168).

Radchenko O.E., Novikova L.Yu. Biological features of the vegetative and flowering phenophase onsets among

diploid plum species in Northwestern Russia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(2):101-111. [in Russian] (Радченко О.Е., Новикова Л.Ю. Биологические особенности фенологических фаз «начало вегетации» и «начало цветения» у диплоидных видов сливы в условиях Северо-Запада России. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(2):101-111). DOI: 10.30901/2227-8834-2023-2-101-111

Reig G., Font i Forcada C., Mestre L., Jiménez S., Betrán J.A., Moreno M.Á. Horticultural, leaf mineral and fruit quality traits of two 'Greengage' plum cultivars budded on plum based rootstocks in Mediterranean conditions. *Scientia Horticulturae*. 2018;232:84-91. DOI: 10.1016/j.scienta.2017.12.052

Sedov E.N., Ogoltsova T.P. (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. [in Russian] (Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур / под ред. Е.Н Седова, Т.П. Огольцовой. Орел: ВНИИСПК; 1999).

State register of varieties and hybrids of agricultural plants admitted for usage: official publication. Moscow; Rosinformagrotekh; 2024. [in Russian] (Государственный реестр сортов и гибридов сельскохозяйственных растений, допущенных к использованию: официальное издание. Москва: Росинформагротех; 2024).

Surányi P. Evaluation of introduced plum varieties under extreme climatic conditions. *International Journal of Horticultural Science*. 2019;25(1-2):7-10. DOI: 10.31421/IJHS/25/1-2./2698

Yoon C.Y., Kim S., Cho J., Kim S. Modeling the impacts of climate change on yields of various Korean soybean sprout cultivars. *Agronomy*. 2021;11(8):1590. DOI: 10.3390/agronomy11081590

Zaremuk R. Improvement of technological elements of fruit production of stone fruit crops in the climatic stress conditions in the North Caucasus. *Fruit Growing and Viticulture of South Russia*. 2013;19(1):38-47. [in Russian] (Заремук Р.Ш. Совершенствование элементов технологии производства плодов косточковых культур в условиях проявления климатических стрессов на Северном Кавказе. *Плодоводство и виноградарство Юга России*. 2013;19(1):38-47).

Zaremuk R.Sh., Kochubey A.A. Introduction of new plum varieties under the conditions of the South of Russia. *Fruit Growing and Viticulture of South Russia*. 2021;67(1):28-43. [in Russian] (Заремук Р.Ш., Кочубей А.А. Интродукция новых сортов сливы в условиях юга России. *Плодоводство и виноградарство Юга России*. 2021;67(1):28-43). DOI: 10.30679/2219-5335-2021-1-67-28-43

Информация об авторе

Ольга Александровна Гореликова, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Крымская опытно-селекционная станция – филиал ВИР, 353384 Россия, Краснодарский край, Крымск, ул. Вавилова, 12, gorelicova.o@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-5099-4638

Information about the author

Olga A. Gorelikova, Cand. Sci. (Agriculture), Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Krymsk Experiment Breeding Station – branch of VIR, 12 Vavilova St., Krymsk 353384, Russia, gorelicova.o@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-5099-4638

Статья поступила в редакцию 07.04.2025; одобрена после рецензирования 12.09.2025; принята к публикации 14.10.2025.
The article was submitted on 07.04.2025; approved after reviewing on 12.09.2025; accepted for publication on 14.10.2025.

КОЛЛЕКЦИИ МИРОВЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СЕЛЕКЦИИ

Научная статья
УДК 633.14:631.524.02;631.524.7
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o22

CC BY

Изучение современных сортов озимой ржи по технологическим свойствам зерна

И. А. Кибкало, И. В. Сафонова

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

Автор, ответственный за переписку: Ирина Владимировна Сафонова, i.safonova@vir.nw.ru

Актуальность. Несмотря на высокую модификационную изменчивость качественных свойств зерна озимой ржи, важной задачей селекции остается создания сортов хлебопекарного направления на основе их комплексного изучения.
Материалы и методы. Произведена технологическая оценка зерна 17 сортов озимой ржи. Три репродукции получены в 2022–2024 гг. в условиях научно-производственной базы «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР», четвертая репродукция – семена учреждений-оригинаторов. Анализ качества зерна осуществляли в соответствии с методическими указаниями и ГОСТами: стекловидность зерна, число падения, термодинамические свойства клейстера, содержание белка, зольность, микровыпечка подового хлеба, реологические свойства теста, содержание пентозанов. Впервые для зерна ржи применили метод двухфазной седиментации.
Результаты. Наиболее стабильные по высоте амилограммы показали сорта ‘Флора’, ‘Московская 18’, ‘Немчиновский 1’, ‘Ильмень’. Сорта ‘Саратовская 10’ и ‘Новосибирская 17’ характеризовались повышенной амилазной активностью в зерне. Высокой стекловидностью обладали сорта ‘Арга’ и ‘Кипрез’. Повышенное содержание пентозанов выявлено у сортов ‘Кипрез’, ‘Дана’, ‘Дарвет’, ‘Графиня’. Результаты седиментационной оценки хорошо дифференцировали образцы, в целом являясь отражением технологических свойств зерна.
Заключение. По большинству критериев технологической оценки и качества зерна имелись значимые межсортовые различия, однако на многие из них оказывали существенное влияние условия выращивания. Сорта ‘Арга’ и ‘Кипрез’ могут использоваться в хлебопечении в дрожжевых рецептурах как улучшители для образцов с нестабильной структурой теста. Сорта ‘Саратовская 10’ и ‘Новосибирская 17’ могут быть использованы в кормопроизводстве. Метод двухфазной седиментации рекомендован для экспресс-оценки качества зерна озимой ржи на малых пробах.

Ключевые слова: *Secale cereale* L., вязкость, число падения, качество, хлебопекарная оценка, стекловидность, термодинамические свойства клейстера, углеводно-амилазный комплекс

***Благодарности*:** работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту № 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».

Для цитирования: Кибкало И.А., Сафонова И.В. Изучение современных сортов озимой ржи по технологическим свойствам зерна. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(1):98-110. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o22

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

© Кибкало И.А., Сафонова И.В., 2026

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

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o22

The study of modern winter rye cultivars based on the technological properties of grain

Ilya A. Kibkalo, Irina V. Safonova

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

Corresponding author: Irina V. Safonova, i.safonova@vir.nw.ru

Background. Despite the high variability of the qualitative properties in winter rye grain under the effect of weather conditions, the development of breadmaking cultivars based on their comprehensive study remains an important task of breeding.
Materials and methods. Technological assessment of grain was performed for 17 winter rye cultivars. Three reproductions were obtained in 2022–2024 under the conditions of the Pushkin and Pavlovsk Laboratories of VIR, the fourth reproduction was seeds from originator institutions. Grain quality was analyzed in accordance with the guidelines and State Standards: grain vitreousness, falling number, thermodynamic properties of the paste, protein content, ash content, microbaking of hearth bread, rheological properties of the dough, and pentosan content. For the first time, the method of two-phase sedimentation was used for rye grain.
Results. The most stable amylogram heights were recorded for cvs. 'Flora', 'Moskovskaya 18', 'Nemchinovsky 1', and 'Ilmen'. Cvs. 'Saratovskaya 10' and 'Novosibirskaya 17' showed increased amylase activity in grain. Cvs. 'Arga' and 'Kiprez' had high vitreousness. Increased pentosan content was observed in cvs. 'Kiprez', 'Dana', 'Darvet', and 'Grafinya'. The sedimentation assessment results differentiated the cultivars well, generally reflecting the technological properties of grain.
Conclusion. There were significant differences among cultivars in most of the technological assessment and grain quality criteria, but many of them were significantly affected by growing conditions. Cvs. 'Arga' and 'Kiprez' can be used in breadmaking as dough conditioners in yeast recipes. Cvs. 'Saratovskaya 10' and 'Novosibirskaya 17' are promising for fodder production. The method of two-phase sedimentation is recommended for express assessment of winter rye grain quality on small samples.

Keywords: *Secale cereale* L., viscosity, falling number, quality, baking test, vitreousness, thermodynamic paste properties, carbohydrate-amylase complex

Acknowledgments: the study was conducted within the framework of the state task according to the thematic plan of VIR, 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".

For citation: Kibkalo I.A., Safonova I.V. The study of modern winter rye cultivars based on the technological properties of grain. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(1):98-110. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o22

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Рожь (*Secale cereale* L.) относится к числу важнейших хлебных культур России, она пластичная по ареалу распространения и наиболее адаптивная для регионов со сложными природно-климатическими условиями (Shabolkina et al., 2017). В современном мировом производстве зерна рожь играет значительно меньшую роль, чем другие зерновые культуры, однако в ряде стран Северной и Центральной Европы имеет важное продовольственное значение (Urban, 2015). Основными мировыми производителями ржи считаются Германия (3,1 млн тонн), Польша (2,3 млн тонн), Россия (1,1 млн тонн), Беларусь (750 тыс. тонн). В этих странах производится около 80% всего мирового сбора зерна этой культуры (Crop cultivation areas…, 2025).

По данным Росстата, в 2025 г. посевные площади ржи в России составляют 451 тыс. га (Cultivated areas…, 2025). По сравнению с 2024 г. (668,3 тыс. га) этот показатель сократился на 28,7%. Сокращение связано с падением спроса на продукцию из ржаной муки и ограниченной рентабельностью производства. Среди традиционных регионов возделывания ржи в России – Поволжье (прежде всего Татарстан и Башкирия), Оренбургская, Саратовская, Волгоградская, Кировская и Воронежская области (Ponomareva et al., 2019).

Зерно озимой ржи традиционно используется в пищевой промышленности (хлеб и хлебобулочные изделия, квас, крахмал, спирт) и кормопроизводстве (силос, сенаж).

По пищевой ценности зерно ржи и ржаной хлеб имеют ряд преимуществ по сравнению с зерном пшеницы и хлебом из нее. Зерно содержит полноценные, богатые незаменимыми аминокислотами белки (8,0–18,7%), углеводы (70,0–80,0%), крахмал (51,8–69,0%), сахара (4,0–6,0%), клетчатку 1(,9–2,2%), золу (1,8–2,1%), жир (1,6–2,6%). Оно является источником различных биологически активных веществ, растворимых пищевых волокон и обладает высокими антиоксидантными свойствами. Содержит много некрахмальных полисахаридов (пентозанов), которые нежелательны в кормовом отношении. Поэтому зерно в комбикормах для животных используют с ограничениями и только в смеси с другими зерновыми культурами. Вместе с тем при хлебопечении пентозаны играют положительную роль, улучшая хлебопекарные качества (Nuzhdina et al., 2023).

Рожь – одна из основных продовольственных культур, зерно которой используется для выработки хлебопекарной муки. Ржаной хлеб обладает ценными питательными свойствами. Содержание полноценных белков, высокая калорийность и наличие витаминов делают ржаной хлеб ценным продуктом питания (Shabolkina et al., 2017).

Морфологические особенности, масса и химический состав зерна ржи изменяются в зависимости от региона и погодных условий, сорта, выполненности и крупности (Goncharenko, 2014). Важной задачей является комплексное изучение качественных свойств зерна ржи для создания сортов хлебопекарного использования. Учитывая основное применение ржи как продовольственное, *целью наших исследований* является изучение технологических показателей качества современных сортов озимой ржи в условиях Северо-Западного региона РФ.

Материалы и методы

Полученный материал для изучения был выращен в 2022–2024 гг. на экспериментальном поле научно-производственной базы (НПБ) «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР», расположенной в Северо-Западном регионе России. Предшественник – чистый пар. Полевое изучение исходного материала проведено согласно «Методическим указаниям по изучению и сохранению мировой коллекции ржи» (Kobylyansky et al., 2015). Технологическая оценка зерна произведена в лаборатории комплексной оценки генетических ресурсов растений ВИР. Для анализа использованы 17 современных (новых) сортов озимой ржи (табл. 1).

Таблица 1. Список современных (новых) сортов озимой ржи
Table 1. The list of modern (new) winter rye cultivars

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Название образца / Accession name	Год репродукции оригиналов / Year of reproduction for the originals	Происхождение (организации, создавшие оригинал сорта) / Origin (institutions where the originals were developed)
11890	‘Саратовская 10’	2018	НИИСХ Юго-Востока, Саратовская область
11891	‘Сударушка’	2018	СибНИИСХиТ, Томская область
11892	‘Новосибирская 17’	2018	СибНИИСХ, Новосибирская область
11893	‘Графиня’	2018	ФАНЦ Северо-Востока, Кировская область
11894	‘Кипрез’		
11895	‘Флора’		
11896	‘Московская 18’	2019	ФИЦ «Немчиновка», Московская область»
11909	‘Немчиновский 1’		
11897	‘Таловская 45’	2019	НИИСХ ЦЧП им. Докучаева, Воронежская область

Таблица 1. Окончание
Table 1. The end

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Название образца / Accession name	Год репродукции оригиналов / Year of reproduction for the originals	Происхождение (организации, создавшие оригинал сорта) / Origin (institutions where the originals were developed)
11903	‘Дана’	2020	ФИЦ картофеля им. Лорха, Ленинградская область
11640	‘Эра’	2019	
11904	‘Дарвет’	2020	УрФАНИЦ УрО РАН, Свердловская область
11905	‘Перемена’	2020	Верхневолжский ФАНЦ, Владимирская область
11906	‘Тагна’	2020	СИФИБР СО РАН, Иркутская область
11907	‘Арга’	2020	Красноярский научный центр СО РАН, Красноярский край
11908	‘Чулпан 9’	2020	ОПХ Чишминское, Башкирский НИИСХ, Башкортостан,
11000	‘Ильмень’	2019	ВИР, г. Санкт-Петербург

Три репродукции получены в 2022–2024 гг. в условиях НПБ «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР», четвертая репродукция – семена учреждений-оригинаторов. Оценку качества зерна проводили в соответствии с методиками национальных стандартов РФ, а также на основе известных методических рекомендаций. Стекловидность зерна определена с помощью диафаноскопа по ГОСТ 10987-76 (GOST 10987-76…, 2009), число падения – по ГОСТ ISO 3093-2016 (GOST ISO 3093-2016…, 2016). Термодинамические свойства клейстера изучены на микро-виско-амилографе фирмы Brabender (Германия) в соответствии с ГОСТ ISO 7973-2013 (GOST 7973-2013…, 2014). Содержание белка и зольность в ржаной муке определены на ИК-анализаторе IM 9500 фирмы Perten (Швеция) с использованием инструкции к прибору. Микровыпечка подового хлеба осуществлялась в соответствии с методическими указаниями «Оценка хлебопекарных свойств образцов мягкой пшеницы, ржи и тритикале» (Komarov et al., 1985). Твердость мякиша ржаного хлеба определяли на структурометре СТ-2 (Россия). Размол зерна осуществляли на лабораторной мельнице 3100 фирмы Perten (Швеция).

Впервые на зерне ржи использована двухфазная методика микроседиментации (Kibkalo et al., 2024). На урожае 2024 г. осуществлено расширенное исследование технологических свойств ржаной муки. Оценены реологические свойства теста на фариографе фирмы Brabender (изучены в соответствии с ГОСТ ISO 5530-1-2013) (GOST ISO 5530-1-2013…, 2014). Также произведена косвенная оценка содержания пентозанов с помощью регистрации кривой набухания водно-мучной суспензии на микро-виско-амилографе фирмы Brabender (Германия) согласно методическим рекомендациям «Качество зерна озимой ржи» (Kulevatova et al., 2016). Статистический анализ данных производился с помощью программ XL и Agros (версия 2.09).

По информации Гидрометеорологического центра, в границах г. Пушкина погодные условия периода вегетации 2022–2024 гг. отличались от средних многолетних показателей температуры воздуха и осадков, что позволило наиболее полно оценить материал (табл. 2).

Наиболее благоприятные условия для формирования зерна сложились в 2022 г. В период цветения ржи температура воздуха была в пределах нормы, наличие осадков благоприятствовало росту и развитию растений. В конце июня и начале июля температура воздуха на 3°С превышала многолетние показатели. В конце июня осадков не наблюдали. Наличие влаги способствовало формированию хорошо выполненного зерна. В 2023 и 2024 г. условия вегетации были менее благоприятные. В 2023 г. избыточное количество осадков в июле (95 мм) привело к сильному полеганию растений ржи, что снизило качество зерна. В 2024 г. в мае температура воздуха была выше среднемноголетних данных (13,3°С), а количества осадков не хватало – такие условия привели к снижению урожая.

Результаты

Состояние углеводно-амилазного комплекса играет существенную роль в определении качества зерна. Для зерна ржи оно часто является основным (Kulevatova et al., 2012). В представленном опыте состояние углеводно-амилазного комплекса зерна выборки сортов озимой ржи оценивалось двумя способами: через определение числа падения (ЧП) и через оценку термодинамических свойств клейстера по протоколу амилографирования на микро-виско-амилографе (Brabender, Германия) (табл. 3).

Качество зерна ржи может быть подвержено существенной изменчивости в зависимости от условий выращивания за счет вариабельности ферментативной активности (Bebyakin et al., 2006). Таким образом, доля влияния внешних факторов в модификационной изменчивости того или иного признака может превышать долю влияния генотипа. И это обстоятельство может существенно затруднять выявление генетически детерминированных различий по этим признакам между генотипами. Поскольку одна из изученных репродукций была синтетической по происхождению, то есть образцы были выращены не только в разных погодных условиях, но и в разных климатических зонах, причем каждый в своей, полученные данные подвергли двум вариантам дис-

Таблица 2. **Характеристика вегетационных периодов, г. Пушкин, 2022–2024 гг.**
Table 2. **Details of the growing seasons, Pushkin, 2022–2024**

Показатель / Indicator	Год / Year	Месяцы / Months			
		май	июнь	июль	август
Σ осадков, мм	2022	25,6	47	75,5	112,6
	2023	16,7	47,9	95	48,5
	2024	7,0	51	97	183,7
	среднемноголетние	47	69	84	87
Температура воздуха, °С	2022	10,0	17,6	19,9	20,6
	2023	11,9	17,3	18,5	19,9
	2024	13,3	18,8	20,1	18,7
	среднемноголетние	11,5	16,1	19,1	17,1

Примечание: погодные данные получены с сайта (http://www.pogodaiklimat.ru/)
Note: weather data were collected from the website (http://www.pogodaiklimat.ru/)

персионного анализа: с учетом этого повторения и с учетом только трех репродукций, выращенных в условиях НПБ «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР».

И действительно, по данным состояния углеводно-амилазного комплекса, вариация признаков, описывающих его, была максимальна с учетом зерна оригинальной репродукции: межсортовые различия по F-критерию не доказывались, тогда как выборки образцов существенно различались между собой по годам. При учете только репродукций, выращенных в условиях НПБ «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР», межсортовые различия были существенны. При этом по высоте амилограммы различия между повторениями не доказывались, тогда как по числу падения существенны были и они. То есть ЧП было более подвержено изменчивости под влиянием погодных условий (см. табл. 3). Другие показатели амилографирования – температура наступления максимальной вязкости клейстера и время наступления максимальной вязкости клейстера – разграничивали изучаемый материал на уровне ЧП. Между показателями амилографии и ЧП установлена достоверная положительная корреляционная связь ($r = 0,09$ при $\rho < 0,01$). Обращают на себя внимание различия между генотипами озимой ржи не только по выраженности признаков состояния углеводно-амилазного комплекса, но и по стабильности их проявления по годам.

Так, наиболее стабильными по высоте амилограммы оказались сорта ‘Флора’, ‘Московская 18’, ‘Немчиновский 1’, сорт-стандарт ‘Ильмень’, причем на высоком уровне выраженности признака. Средняя степень изменчивости была характерна для сортов ‘Дарвет’ и ‘Тагна’, высокая – для сортов ‘Саратовская 10’, ‘Арга’, сорта-стандарта ‘Эра’. В условиях НПБ «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» стабильно высокую амилазную активность (ЧП) в зерне за время изучения продемонстрировали ‘Саратовская 10’ и ‘Новосибирская 17’, что говорит о неустойчивости этих сортов к прорастанию зерна на корню.

Другим важным показателем технологических свойств зерна является стекловидность, отражающая консистенцию эндосперма зерновки. Принято различать и регистрировать стекловидность полную, отражающую количество полностью стекловидных зерен, и стекловидность общую, учитывающую и полустекловидные зерна (табл. 4). Полная стекловидность достоверно не разграничивала экспериментальный материал в обоих вариантах обработки. Общая стекловидность, напротив, значимо по F-критерию дифференцировала образцы, при этом не имея доказанного влияния условий выращивания даже с учетом оригинальной репродукции зерна, что говорит о высокой степени генетической детерминированности данного признака.

Наиболее мучнистым зерном обладал сорт ‘Саратовская 10’, он же показал максимальную изменчивость этого критерия по годам. В среднем самую высокую стекловидность в сочетании со средней ее вариабельностью продемонстрировал сорт ‘Арга’. Самый низкий показатель стекловидности зерна (мучнистый характер эндосперма и его высокая изменчивость, $V = 63,5\%$) был установлен для сорта ‘Саратовская 10’, самый высокий со средней степенью изменчивости ($V = 17,0\%$) – для сорта ‘Арга’, средний с низкой изменчивостью ($V = 3,7\%$) – для сорта ‘Кипрес’ (см. табл. 4).

В пищевом и кормовом направлении переработки зерна важное значение имеют содержание белка и зольность, влияющие на питательную ценность. В изученной выборке сортов озимой ржи по содержанию белка не получено значимых межсортовых различий, однако репродукции существенно различались в обоих вариантах обработки, что говорит о ключевом влиянии на этот признак условий выращивания. При этом вариация признака по сортам была на низком и среднем уровнях. Зольность, напротив, оказалась существенно зависима как от условий выращивания, так и от генотипа также в обоих вариантах обработки. Вариация признака по сортам была невысокой. Самой низкой зольностью, по многолетним данным, обладал сорт ‘Новосибирская 17’, а самой высокой – ‘Немчиновский 1’ (см. табл. 4).

Из-за часто высокой ферментативной активности ржаной муки и отсутствия клейковинных белков пробную выпечку ржаного хлеба производят при повышенной кислотности теста, используя при этом закваски или органические кислоты, что позволяет получать хлеб достаточных объема и формы. Важными показателями хлебопекарной оценки образцов при этом являются объем полученного хлеба (в случае микровыпечек рассчитыва-

Таблица 3. **Состояние углеводно-амилазного комплекса у сортов озимой ржи**
Table 3. **The state of the carbohydrate-amylase complex in winter rye cultivars**

Сорт / Cultivar		Высота амилограммы / Amylogram peak		Время максимальной вязкости / Maximum viscosity time		Температура максимальной вязкости / Maximum viscosity temperature		Число падения / Falling number	
		X, ед. пр.	V, %	X, мин	V, %	X, °C	V, %	X, с	V, %
‘Саратовская 10’		350,3	67,6	5,17	14	69,55	8,7	127,5	90,2
‘Сударушка’		251,7	28,1	5,23	11,6	69,66	3	105,0	16,5
‘Новосибирская 17’		237,8	44	5,23	2,8	66,27	2,5	95,5	38,4
‘Графиня’		386,0	42,4	5,28	4,5	70,65	6,8	142,0	49,5
‘Кипрез’		380,0	21,3	5,20	4,2	69,85	3,4	124,5	29,4
‘Флора’		491,0	5,9	5,52	2,9	72,65	3	151,8	14,4
‘Московская 18’		361,0	8,9	5,46	7,0	72,6	3,4	134,0	21,6
‘Таловская 45’		353,5	24,8	5,24	9,3	70	4,8	118,5	37,2
‘Дана’		348,0	30,7	5,38	16,5	69,52	10	125,8	55,9
‘Дарвет’		367,0	18,2	5,49	6,0	71,85	4,9	136,5	32,6
‘Перемена’		356,8	35,5	5,37	14,2	71,37	7,1	130,5	42,7
‘Тагна’		418,0	16,8	5,52	9,2	71	6,8	141,8	22,5
‘Арга’		367,0	80,7	5,53	19,8	71,82	11,8	147,5	80,1
‘Чулпан 9’		366,5	46,3	5,65	21,9	73,22	10,4	167,0	73,3
‘Немчиновский 1’		405,8	8,8	5,57	9,8	72,97	5,4	148,5	25,4
‘Эра’		410,5	71,3	5,60	22,9	73,5	11,6	184,0	83
‘Ильмень’		655,0	1,3	7,16	3,8	83,05	3	256,0	6,8
4 года	F-год	11,9*		4,4*		9,8*		13*	
	F-сорт	ns		ns		ns		ns	
	НСР	–		–		–		–	
3 года	F-год	ns		12,8*		22,1*		21*	
	F-сорт	4,6*		3,1*		4,1*		3,6*	
	НСР	122		0,67		4,6		47	

Примечание: X – среднее арифметическое значение за 4 года; ns – различия несущественны; V – коэффициент внутрисортовой вариации; F – F-критерий; * – значимость F-критерия

Note: X – arithmetic mean value for 4 years; ns – insignificant differences; V – coefficient of intracultivar variation; F – the F-test; * – significance of the F-test

ют объем на 100 г муки) и формоустойчивость подового хлеба h/d (отношение высоты к диаметру). В представленном опыте объем ржаного подового хлеба имел существенные межсортовые различия, однако и репродукции разных лет значимо различались друг от друга в обоих вариантах обработки, показывая существенное влияние на этот признак условий выращивания (табл. 5).

Межсортовые различия по h/d не были выявлены. Обработка с учетом оригинальных репродукций выявляла значимые различия между наборами сортов по годам. Лидерами по объему хлеба за четыре года изучения стали ‘Саратовская 10’, ‘Сударушка’, сорт-стандарт ‘Эра’. Объем хлеба и h/d характеризовались средней и низкой внутрисортовой вариабельностью по годам.

Качество хлебного мякиша оценивали по его твердости, а также по скорости его черствения за сутки после выпечки. Выяснилось, что твердость мякиша через 2 часа после выпечки давала значимые межсортовые различия даже с учетом оригинальной репродукции, а различия между выборками по годам не доказывались. Черствение же за сутки после выпечки было подвержено влиянию условий года. При этом и тот и другой признак име-

Таблица 4. Технологическая оценка сортов озимой ржи
Table 4. Technological assessment of winter rye cultivars

Сорт / Cultivar		Полная стекловидность / Total vitreousness		Общая стекловидность / General vitreousness		Содержание белка / Protein content		Зольность / Ash content	
		X, %	V, %	X, %	V, %	X, %	V, %	X, %	V, %
‘Саратовская 10’		2,0	91,3	2,0	63,5	12,57	15,6	1,49	12,5
‘Сударушка’		2,0	100	2,0	31,1	14,24	3,4	1,66	6,1
‘Новосибирская 17’		13,0	84,3	13,0	32,4	13,44	10,6	1,37	8,3
‘Графиня’		9,0	78,6	9,0	44,4	12,65	9,5	1,58	6,4
‘Кипрез’		6,5	32	6,5	3,7	12,30	9,3	1,56	6,5
‘Флора’		3,3	52,6	3,3	28,5	12,15	14,7	1,6	5,3
‘Московская 18’		4,5	121	4,5	43,2	12,89	7,1	1,49	4
‘Таловская 45’		7,8	79,1	7,8	48,7	12,71	5,5	1,46	2,5
‘Дана’		5,8	99,8	5,8	37,6	11,73	18,6	1,54	2,7
‘Дарвет’		3,3	76,9	3,3	13,6	13,25	10,3	1,43	3
‘Перемена’		5,5	176	5,5	40,4	12,97	7	1,55	6,8
‘Тагна’		5,3	151	5,3	32,2	12,92	4,1	1,63	5,6
‘Арга’		10,5	62,5	10,5	17	13,07	8,6	1,43	7,6
‘Чулпан 9’		5,5	140,4	5,5	52,1	12,78	10,7	1,49	5,6
‘Немчиновский 1’		5,0	137,6	5,0	39,7	13,17	13,6	1,74	11,8
‘Эра’		4,5	38,5	4,5	39,3	12,25	7,2	1,61	7
‘Ильмень’		5,0	28,3	5,0	19,4	12,57	15,6	1,49	12,5
4 года	F-год	ns		ns		34,6*		17,6*	
	F-сорт	ns		2,2*		ns		5,7*	
	НСР	-		14,3		–		0,11	
3 года	F-год	ns		–		5,7*		10,6*	
	F-сорт	ns		–		ns		4,3*	
	НСР	–		–		–		0,13	

Примечание: X – среднее арифметическое значение за 4 года; ns – различия несущественны; V – коэффициент внутрисортовой вариации; F – F-критерий; * – значимость F-критерия

Note: X – arithmetic mean value for 4 years; ns – insignificant differences; V – coefficient of intracultivar variation; F – the F-test; * – significance of the F-test

ли широкий спектр типов вариабельности в зависимости от сорта – от низкой до высокой.

В связи с тем что объективные методы оценки качества ржаного хлеба давали не всегда надежную дифференциацию, общую хлебопекарную оценку (ОХО) решили рассчитать как сумму баллов за отдельные критерии при ранжировании сортов внутри выборки. Таким образом, чем меньшую сумму баллов набирал образец, тем более высокий общий ранг он имел. Рассчитанная таким образом ОХО дифференцировала изученный материал на уровне твердости хлебного мякиша, то есть показывала существенную генотипическую обусловленность. Самые высокие места по ОХО заняли сорт-стандарт ‘Эра’ и ‘Саратовская 10’. Однако вариабельность этого показателя именно у этих сортов по годам была значительной. Самые высокие ранги при низкой вариабельности ОХО были у сортов ‘Сударушка’ и ‘Арга’ (см. табл. 5).

Для обобщенной оценки качества зерна большое распространение получил метод седиментационного анализа в различных модификациях. В основном он применяется для определения качества клейковинных белков пшеницы (Ivanisova et al., 2024), однако, поскольку способность к набуханию продуктов размола лежит в основе практически любой переработки зерна, он предлагается и для других культур (Kibkalo, 2022). В представленном опыте впервые для зерна ржи применили метод двух-

Таблица 5. Хлебопекарная оценка сортов озимой ржи

Table 5. Baking test of winter rye cultivars

Сорт / Cultivar		Объем на 100 г муки / Volume per 100 g of flour		Формоустойчивость h/d / Shape stability h/d		Твердость мякиша / Crumb hardness		Черствение / Hardening		ОХО / OBS	
		X, мл	V, %	X	V, %	X, г нагрузки	V, %	X, г нагрузки	V, %	X, балл	V, %
‘Саратовская 10’		188,3	10,6	0,53	10,1	733,5	19,4	2011,00	49,3	25,3	20,9
‘Сударушка’		184,3	5,6	0,57	6,3	906,0	43,0	2172,00	9,8	28,3	8,3
‘Новосибирская 17’		170,0	6,6	0,54	3,5	772,5	23,5	2291,75	35,4	32,9	35,6
‘Графиня’		170,3	6,8	0,59	10,1	1052,0	19,1	2621,25	48,1	34,8	22,9
‘Кипрез’		160,0	5,8	0,60	10,3	1238,0	30,1	2121,50	41,2	35,9	20,0
‘Флора’		171,8	11,4	0,59	2,9	870,0	3,0	3125,00	31,2	32,9	6,3
‘Московская 18’		171,8	11,4	0,55	6,8	845,0	10,4	1983,25	13,4	29,5	15,6
‘Таловская 45’		160,0	6,5	0,57	19,5	727,3	38,0	2010,25	42,1	27,3	33,6
‘Дана’		156,5	8,8	0,57	14,1	973,3	22,7	2356,00	35,7	40,5	25,9
‘Дарвет’		160,0	3,1	0,55	5,9	1004,3	15,7	2545,75	13,0	41,0	13,5
‘Перемена’		171,5	4,9	0,57	7,3	692,5	27,6	2389,00	19,6	28,8	30,3
‘Тагна’		163,5	2,1	0,61	4,9	903,8	10,3	2057,25	26,3	29,0	12,4
‘Арга’		168,5	9,3	0,57	7,2	821,0	11,4	2215,25	30,1	27,3	8,0
‘Чулпан 9’		158,3	4,2	0,59	14,4	1180,8	23,6	3056,00	36,7	42,4	12,3
‘Немчиновский 1’		161,8	6,9	0,56	0,55	836,3	4,5	1759,50	39,0	30,9	12,8
‘Эра’		183,0	7,7	0,50	0,535	600,5	22,3	2048,50	15,6	24,3	42,3
4 года	F-год	4,3*		4,7*		ns		7,5*		ns	
	F-сорт	2,4*		ns		2,8*		ns		2,8*	
	НСР	16,9		–		280,3		–		9,5	
3 года	F-год	5,8*		ns		ns		6,5*		–	
	F-сорт	3,3*		ns		ns		ns		–	
	НСР	18		–		–		–		–	

Примечание: X – среднее арифметическое значение за 4 года; ns – различия несущественны; ОХО – общая хлебопекарная оценка; V – коэффициент внутрисортовой вариации; F – F-критерий; * – значимость F-критерия

Note: X – arithmetic mean value for 4 years; ns – insignificant differences; OBS – overall baking score; V – coefficient of intracultivar variation; F – the F-test; * – significance of the F-test

фазной седиментации (Kibkalo et al., 2024). При этом регистрировались четыре показателя: объем осадка первой уксусной фазы седиментации (Ф1), объем осадка второй фазы седиментации – с добавлением поверхностно-активного вещества SDS (Ф2), отношение объемов второй фазы анализа к первой, отражающее устойчивость экспериментального материала к физико-химическим нагрузкам, и сумма объемов осадков двух фаз, показывающая общий потенциал набухания (табл. 6).

Дисперсионный анализ полученных данных показал, что объемы осадков и первой, и второй фаз испытания успешно дифференцировали экспериментальный материал, однако были существенно подвержены влиянию условий выращивания. По показателю устойчивости набухания (Ф2/Ф1) значимо между собой различались изученные репродукции ржи разных лет, а по показателю общего потенциала набухания (Ф2+Ф1) доказывались только межсортовые различия. При этом все четыре критерия неплохо воспроизводились по годам, показав уровень внутрисортовой вариации от низкой до средней.

Для кормовой ценности ржи большое значение имеет содержание в зерне пентозанов, которые также играют важную роль в стабилизации ржаного теста в процессе хлебопечения (Nuzhdina et al., 2016). В связи с этим образцы ржи урожая 2024 г. изучили на содержание пентозанов. С помощью микро-виско-амилографа были за-

Таблица 6. Седиментационная оценка сортов озимой ржи
Table 6. Sedimentation assessment of winter rye cultivars

Сорт / Cultivar		Ф1 / F1		Ф2 / F2		Ф2/Ф1 / F1/F2		Ф2+Ф1 / F1+F2	
		X, мл	V, %	X, мл	V, %	X	V, %	X, мл	V, %
‘Саратовская 10’		61,8	6,4	43,3	14,3	0,70	12,8	105,0	7,9
‘Сударушка’		67,7	10,7	54,3	15,3	0,81	17,8	122,0	9,9
‘Новосибирская 17’		60,8	4,9	47,5	15,1	0,79	18,6	108,3	5,5
‘Графиня’		64,5	0,9	50,8	15	0,79	15,4	115,3	6,6
‘Кипрез’		67,5	12,2	52,8	9,3	0,79	15,8	120,3	7,5
‘Флора’		72,3	10,3	50,0	3,3	0,70	10,3	122,3	6,5
‘Московская 18’		59,5	7,9	41,3	7,2	0,70	9,2	100,8	6,1
‘Таловская 45’		63,5	1,6	44,5	12,0	0,70	12,3	108,0	5,1
‘Дана’		71,0	10,6	54,5	12,4	0,77	12,5	125,5	9,5
‘Дарвет’		64,3	5,5	51,0	2,3	0,80	5,9	115,3	3,3
‘Перемена’		64,8	7,7	47,8	10,7	0,74	9,7	112,5	7,8
‘Тагна’		67,5	2,8	49,3	9,3	0,73	8,4	116,8	4,9
‘Арга’		67,3	10,2	49,5	16	0,73	17,5	116,8	8,1
‘Чулпан 9’		65,5	5,1	51,8	13,1	0,77	13,9	117,3	4,4
‘Немчиновский 1’		66,0	11,2	47,0	7,7	0,72	15,2	113,0	6,1
‘Эра’		66,0	8,6	49,5	4,3	0,76	12,2	115,5	3,1
4 года	F-год	10,4*		6,5*		24,6*		ns	
	F-сорт	2,9*		2,3*		ns		2,9*	
	НСР	5,8		6,9		–		10,7	
3 года	F-год	6*		5,7*		18,9*		–	
	F-сорт	2,2*		ns		ns		–	
	НСР	6,5		–		–		–	

Примечание: X – среднее арифметическое значение за 4 года; ns – различия несущественны; V – коэффициент внутрисортовой вариации; F – F-критерий; * – значимость F-критерия

Note: X – arithmetic mean value for 4 years; ns – insignificant differences; V – coefficient of intracultivar variation; F – the F-test; * – significance of the F-test

писаны кривые набухания ржаных суспензий при комнатной температуре в течение 30 минут. Максимальные значения вязкости суспензии отражали количество водорастворимых пентозанов в образцах зерна ржи (Kulevatova et al., 2016). Произведена оценка реологических свойств ржаного теста на фариографе (табл. 7).

По всем зарегистрированным показателям выявлена значительная межсортовая дифференциация. По максимуму кривой набухания обнаружено, что сорт ‘Саратовская 10’ можно признать низкопентозановым. Также невысокое содержание водорастворимых пентозанов можно прогнозировать у ‘Новосибирской 17’. Высокопентозановыми можно признать сорта: ‘Кипрез’, ‘Дана’, ‘Дарвет’, ‘Графиня’. Остальные сорта ржи занимали промежуточное положение. С помощью фариографа выявлено, что лидер по содержанию водорастворимых пентозанов – сорт ‘Кипрез’ – обладает уникальными реологическими свойствами теста. Фариограммы сортов ржи ‘Кипрез’ и ‘Арга’ соответствовали «сильным» сортам пшеницы. Логично предположить, что повышенная устойчивость ржаного теста при реологических испытаниях обусловлена содержанием пентозанов. Коэффициент корреляции максимума набухания и показателей фариографа был в пределах (r = 0,43–0,61*), однако его нельзя назвать максимально возможным. Обращает на себя внимание разнообразие реологических свойств теста, особенно заметное по значениям его разжижения в сравнении с прогнозом содержания пентозанов. И если низкое значение содержания водорастворимых пентозанов закономерно соответствовало высокой степени разжижения у сортов ‘Саратовская 10’ и ‘Новосибирская 17’, то образцы со средним и высоким содержанием водорастворимых пентозанов имели разнообразные значения разжижения теста. Испытание теста на фариографе прово-

Таблица 7. **Реологические свойства ржаной водно-мучной суспензии и ржаного теста**
Table 7. **Rheological properties of rye flour-water suspension and rye dough**

Сорт / Cultivar	Максимальная вязкость суспензии, ед. пр. / Maximum suspension viscosity, units	Показатели фариограммы / Farinogram indicators				
		Время образования теста, мин / Dough development time, min	Стабильность теста, мин / Dough stability, min	Разжижение теста, ед. пр. / Dough softening, units	Коэффициент качества, мм / Quality factor, mm	Число валориметра, усл. ед. / Valorimeter value, arbit. units
‘Саратовская 10’	151	1,55	0,65	71	21	44
‘Сударушка’	400	1,9	0,47	77	35	45
‘Новосибирская 17’	282	2,15	0,98	81	37	45
‘Графиня’	600	2,8	1,17	26	100	62
‘Кипрез’	707	83,75	17,2	18	843	100
‘Флора’	429	2,15	1,63	34	74	54
‘Московская 18’	500	2,02	1,1	40	39	54
‘Таловская 45’	355	2,42	1,27	26	44	60
‘Дана’	695	2,02	1,1	50	40	54
‘Дарвет’	619	2,82	1,8	17	150	62
‘Перемена’	517	2,6	2,07	34	134	56
‘Тагна’	539	2,63	1,82	28	60	60
‘Арга’	529	10,0	9,58	15	221	80
‘Чулпан 9’	497	3,17	1,55	50	47	57
‘Немчиновский 1’	389	2,85	2,28	31	61	57
‘Эра’	481	1,55	0,65	71	21	44
V, %	30,4	257,3	153,6	53,3	166,3	24,5

Примечание: V – коэффициент межсортовой вариации
Note: V – coefficient of intercultivar variation

дится при повышенной, в сравнении с записью кривой набухания, температуре 30°С, что ближе к оптимальной температуре действия пентозаназ (ксиланаз) – ферментов, расщепляющих пентозаны (Kulevatova et al., 2016).

Таким образом, на реологические свойства теста, вероятно, влияло не только количественное значение пентозанов в зерне ржи, но и активность ферментов их расщепляющих. Так, очевидно, что у сортов ‘Кипрез’ и ‘Арга’ активность пентозаназ была чрезвычайно низкой, а у сортов ‘Сударушка’, ‘Дана’, ‘Чулпан 9’ и ‘Эра’ – высокой при высоком и среднем содержании самих водорастворимых пентозанов.

Обсуждение результатов

Технологическое качество зерна, ржи в частности, описывается множеством взаимодополняющих параметров и признаков, которые находятся между собой порою в неоднозначном взаимовлиянии, которое может значительно меняться в зависимости от условий произрастания. В изученной выборке сортов озимой ржи практически по всем зафиксированным характеристикам выявлено значительное разнообразие – как по степени выраженности, так и по степени воспроизводимости – в течение ряда лет. Исключением стало значение содержания белка в зерне, которое оказалось более всего подвержено влиянию условий выращивания. Межсортовые различия по содержанию белка в зерне и показатели формоустойчивости подового хлеба h/d не доказывались. Последний факт можно объяснить как тем, что h/d является селекционным признаком, характеризующим хлебопекарные свойства образца, а представленные в выборке генотипы являются прошедшими селекционный отбор сортами, так и тем, что в условиях «кислого» тестоведения различия между сортами, обусловленные разнообразием

ферментативной активности, нивелируются за счет ее подавления. Вместе с тем данный показатель не находится в отрыве от других технологических свойств. Так, было выявлено, что h/d значимо связан с показателями реологии теста: с временем образования теста (0,62*) на урожае 2024 г., на котором производилась фариографическая оценка; со стабильностью теста (r = 0,65*); с коэффициентом качества фариографа (r = 0,67*); с числом валориметра (r = 0,65*) в год испытания реологии теста и (r = 0,54*) по средним многолетним значениям h/d; разжижение теста имело отрицательную взаимосвязь с h/d (r = –0,51*). На формоустойчивость подового хлеба положительно влияло содержание водорастворимых пентозанов, что видно по выраженности максимума кривой набухания: (r = 0,57*) в год репродукции и (r = 0,53*) по средним многолетним значениям.

Если говорить о хлебопекарной оценке по примененной методике в целом, то отчетливо прослеживается две противоположные тенденции. Повышенная ферментативная активность, низкое содержание водорастворимых пентозанов, влияющие на разжижение теста и снижение h/d, вместе с тем способствовали лучшему подъему теста и, как следствие, увеличению объема хлеба, а также снижению жесткости хлебного мякиша и скорости черствения. Пониженная ферментативная активность, повышенное содержание водорастворимых пентозанов помогли сформировать более плотный каркас ржаного теста и хлебного мякиша, который улучшал формоустойчивость, но сокращал объем хлеба и придавал ему механическую жесткость. Иллюстрируется это следующими коэффициентами корреляции. На объем хлеба оказывало отрицательное влияние содержание водорастворимых пентозанов по кривым набухания (–0,58*…–0,79*), с ним были отрицательно связаны число валориметра и коэффициент качества фариографа (–0,52*), положительно – разжижение теста (0,51*…0,63*), отрицательно – величина числа падения (–0,68*) и высота амилограммы (–0,67*), а также консистенция эндосперма зерна, выраженная через общую стекловидность по средним многолетним данным (–0,58*). Такая же тенденция наблюдалась в отношении жесткости хлебного мякиша, его черствения и общей хлебопекарной оценки.

Впервые на зерне ржи была применена двухфазная методика седиментационного анализа, результаты которого предположительно могли бы рассматриваться как экспресс-оценка хлебопекарных образцов зерна ржи. Действительно, выяснилось, что на результаты седиментационного анализа оказывает влияние максимум кривой набухания, а значит и содержание водорастворимых пентозанов. Своей максимальной выраженности это влияние достигает на величину объема второй фазы седиментации Ф2: 0,84* в год репродукции и 0,59* по средним многолетним значениям Ф2; на общий потенциал набухания Ф1+Ф2 – соответственно 0,80* и 0,56*. Показатель формоустойчивости подового хлеба h/d имел максимальную положительную взаимосвязь, по средним многолетним данным, с величиной осадка первой фазы набухания Ф1 и общим потенциалом набухания 0,53*. Твердость мякиша имела максимальную взаимосвязь, так же как и содержание водорастворимых пентозанов, с величиной Ф2 (0,56*). Показатель устойчивости набухания Ф2/Ф1 оказался взаимосвязан в год испытания с содержанием водорастворимых пентозанов по кривой набухания (0,72*) и числом валориметра (0,56*).

Заключение

В результате изучения сортов озимой ржи сделаны определенные выводы: по большинству зарегистрированных критериев технологической оценки и качества зерна, в том числе по показателям состояния углеводно-амилазного комплекса и хлебопекарных свойств, имелись значимые межсортовые различия, что говорит о их генетической детерминированности, однако и влияние условий года также доказывалось. Максимальную независимость от условий выращивания продемонстрировали: общая стекловидность, твердость мякиша ржаного хлеба и показатель общего потенциала набухания седиментационного анализа (Ф1+Ф2). В наибольшей степени подвержены влиянию условий выращивания: содержание протеина в зерне, черствение хлебного мякиша и показатель устойчивости набухания седиментационного анализа (Ф2/Ф1). На примере урожая 2024 г. выявлены значительные различия между изученными образцами по максимальным значениям кривой набухания водно-мучной суспензии, отражающим содержание водорастворимых пентозанов в зерне ржи, и по реологическим свойствам теста, а также по активности пентозаназ в ржаном тесте. Изученные генотипы также различались по стабильности проявления по годам признаков технологической ценности зерна. Одним из самых вариабельных по целому комплексу признаков оказался сорт ‘Саратовская 10’. Также этот сорт интересен тем, что в условиях НПБ «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» сформировал зерно с самой высокой амилазной активностью, имел самую низкую стекловидность, а также тем, что его можно назвать низкопентозановым. Однако сочетание этих признаков при «кислом» тестоведении давало высокую общую хлебопекарную оценку за счет повышенного, по сравнению с другими образцами, объема хлеба, низкой твердости хлебного мякиша и невысоких темпов черствения. Близким к ‘Саратовской 10’ по низкому содержанию водорастворимых пентозанов и повышенной амилазной активности оказался сорт ‘Новосибирская 17’. Вероятно, эти два сорта пригодны для кормового использования. Повышенной вариабельностью амилазной активности обладали также сорта ‘Арга’ и ‘Эра’ (стандарт). Однако сорт ‘Арга’ оказался уникален тем, что при средних значениях содержания водорастворимых пентозанов он обладал самым низким значением разжижения теста, что, вероятно, говорит о низкой активности пентозаназ. Возможно, именно этот фактор позволил ему оказаться самым стекловидным по опыту и достаточно стабильным по другим критериям оценки. Вторым уникальным сортом с самым высоким содержанием водорастворимых пентозанов и низкой активностью пентозаназ оказался сорт ‘Кипрез’, который, так же как и ‘Арга’, характеризовался достаточно высокой стабильностью выраженности признаков технологической оценки. Эти два сорта озимой ржи по итогу реологических испытаний теста обладали фариограммой на уровне сильных пшениц. Это говорит о том, что они могут использоваться в хлебопечении в дрожжевых рецептурах и как улучшители для образцов с нестабильной структурой теста.

Тестирование двухфазной методики седиментационной оценки на зерне озимой ржи показало, что полученные данные достаточно хорошо дифференцировали экспериментальный материал и по своей выраженности

в целом являлись отражением технологических свойств зерна. Таким образом, данный метод может быть рекомендован для экспресс-оценки качества зерна озимой ржи на малых пробах.

References / Литература

Bebyakin V.M., Kulevatova T.B., Velikanova N.M. Estimation of plasticity and stability of winter rye varieties on the parameters of carbohydrate-amylase grain complex. *Agricultural Biology*. 2006;41(3):43-48. [in Russian] (Бебякин В.М., Кулеватова Т.Б., Великанова Н.М. Оценка пластичности и стабильности сортов озимой ржи по показателям углеводно-амилазного комплекса зерна. *Сельскохозяйственная биология*. 2006;41(3):43-48).

Crop cultivation areas in Russia, data for 2025 (Posevnye ploshchadi selskokhozyaystvennykh kultur v Rossii, dannye na 2025 god). AB-Centre.ru; 2025. [in Russian] (Посевные площади сельскохозяйственных культур в России, данные на 2025 год. AB-Centre.ru; 2025). URL: https://ab-centre.ru/news/posevnye-ploschadi-nekotoryhklyuchevyh-selskohozyaystvennyh-kultur-v-rossii-dannyena-2025-god [дата обращения: 16.10.2025].

Cultivated areas in the Russian Federation in 2025 (Posevnye ploshchadi Rossiyskoy Federatsii v 2025 godu). Moscow: Rosstat; 2025. [in Russian] (Посевные площади Российской Федерации в 2025 году. Москва: Росстат; 2025). URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/posev-4cx_2025.xlsx [дата обращения: 16.10.2025].

Goncharenko A.A. Topical issues of winter rye breeding (Aktualnye voprosy selektsii ozimoy rzhi). Moscow; 2014. [in Russian] (Гончаренко А.А. Актуальные вопросы селекции озимой ржи. Москва; 2014).

GOST 10987-76. Interstate standard. Grain. Methods for determination of vitreousness. Moscow: Standartinform; 2009. [in Russian] (ГОСТ 10987-76. Межгосударственный стандарт. Зерно. Методы определения стекловидности. Москва: Стандартинформ; 2009). URL: https://docs.cntd.ru/document/1200024313 [дата обращения: 14.10.2025].

GOST ISO 3093-2016. Interstate standard. Wheat, rye and their flours, durum wheat and durum wheat semolina – Determination of the falling number according to Hagberg–Perten IDT. Moscow: Standartinform; 2016. [in Russian] (ГОСТ ISO 3093-2016. Межгосударственный стандарт. Зерно и продукты его переработки. Определение числа падения методом Хагберга – Пертена. Москва: Стандартинформ; 2016). URL: https://meganorm.ru/Data2/1/4293751/4293751055.pdf [дата обращения: 14.10.2025].

GOST ISO 5530-1-2013. Interstate standard. Wheat flour. Physical characteristics of the dough. Part 1. Determination of water absorption and rheological properties using a farinograph. Moscow: Standartinform; 2014. [in Russian] (ГОСТ ISO 5530-1-2013. Межгосударственный стандарт. Мука пшеничная. Физические характеристики теста. Часть 1. Определение водопоглощения и реологических свойств с применением фариографа. Москва: Стандартинформ; 2014). URL: https://meganorm.ru/Data2/1/4293781/4293781265.pdf [дата обращения: 14.10.2025].

GOST ISO 7973-2013. Interstate standard. Grain and cereal products. Determination of the viscosity using an amylograph. Moscow: Standartinform; 2014. [in Russian] (ГОСТ ISO 7973–2013. Межгосударственный стандарт. Зерно и зернопродукты. Определение вязкости с применением амилографа. Москва: Стандартинформ; 2014). URL: https://meganorm.ru/Data2/1/4293772/4293772909.pdf [дата обращения: 19.03.2025].

Ivanisova A.S., Marchenko D.M., Dubinina O.A., Maidaburo L.I., Kravchenko N.S. Physicochemical properties of grain of promising winter durum wheat varieties and lines in the south of the Rostov region. *Grain Economy of Russia*. 2024;16(5);46-51. [in Russian] (Иванисова А.С., Марченко Д.М., Дубинина О.А., Майдабуро Л.И., Кравченко Н.С. Физико-химические свойства зерна перспективных сортов и линий озимой твердой пшеницы в условиях юга Ростовской области. *Зерновое хозяйство России*. 2024;16(5);46-51). DOI: 10.31367/2079-8725-2024-94-5-46-51

Kibkalo I. Effectiveness of and perspectives for the sedimentation analysis method in grain quality evaluation in various cereal crops for breeding purposes. *Plants (Basel)*. 2022;11(13):1640. DOI: 10.3390/plants11131640

Kibkalo I.A., Loskutov I.G., Voitsutskaya N.P., Solovyova M.V., Obukhova N.S., Blinova E.V. Development of methodological approaches to assessing the technological properties of oat grain. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2024;7(2):6-15. [in Russian] (Кибкало И.А., Лоскутов И.Г., Войцуцкая Н.П., Соловьева М.В., Обухова Н.С., Блинова Е.В. Разработка методических подходов к оценке технологических свойств зерна овса. *Биотехнология и селекция растений*. 2024;7(2):6-15). DOI: 10.30901/2658-6266-2024-2-o2

Kobylyansky V.D., Safonova I.V., Solodukhina O.V., Aniskov N.I. Guidelines for the study and preservation of the world collection of rye (Metodicheskiye ukazaniya po izucheniyu i sokhraneniyu mirovoy kollektsii rzhi). St. Petersburg: VIR; 2015. [in Russian] (Кобылянский В.Д., Сафонова И.В., Солодухина О.В., Аниськов Н.И. Методические указания по изучению и сохранению мировой коллекции ржи. Санкт-Петербург: ВИР; 2015).

Komarov V.I., Stepanova G.I., Rakitina A.N. (comp.). Evaluation of baking properties in bread wheat, rye, and triticale accessions: guidelines (Otsenka khlebopekarnykh svoystv obraztsov myagkoy pshenitsy, rzhi i triticale: metodicheskiye ukazaniya). V.I. Komarov (ed.). Leningrad: VIR; 1985. [in Russian] (Оценка хлебопекарных свойств образцов мягкой пшеницы, ржи и тритикале. Методические указания / сост. В.И. Комаров, Г.И. Степанова, А.Н. Ракитина; под ред. В.И. Комарова. Ленинград: ВИР; 1985).

Kulevatova T.B., Kayrgaliev D.V., Andreeva L.V. Ermolaeva T. Ya., Zlobina L.N., Nuzdina N.N. Quality of winter rye grain. Educational and methodological guide (Kachestvo zerna ozimoy rzhi. Uchebno-metodicheskoye posobiye). A.I. Pryanishnikov (ed.). Saratov; 2016. [in Russian] (Кулеватова Т.Б., Кайргалиев Д.В., Андреева Л.В., Ермолаева Т.Я., Злобина Л.Н., Нуждина Н.Н. Качество зерна озимой ржи. Учебно-методическое пособие / под ред. А.И. Прянишникова. Саратов; 2016).

Kulevatova T.B., Zlobina L.N., Andreeva L.V., Nuzhdina N.N. Sensibility of grain quality indexes of winter rye to germinate. *Agro XXI*. 2012;(1-3):12-14. [in Russian] (Кулеватова Т.Б., Злобина Л.Н., Андреева Л.В., Нуждина Н.Н. Чувствительность показателей качества зерна озимой ржи к прорастанию. *Агро XXI*. 2012;(1-3):12-14).

Nuzhdina N.N., Yermolaeva T.Y., Kulevatova T.B., Andreeva L.V., Zlobina L.N. Research results of grain quality of winter ruttishness varieties. *Agrarian Reporter of South-East.* 2016;1-2(14-15):35-37. [in Russian] (Нуждина Н.Н., Ермолаева Т.Я., Кулеватова Т.Б., Андреева Л.В., Злобина Л.Н. Результаты изучения качества зерна сортов озимой

ржи. *Аграрный вестник Юго-Востока.* 2016;1-2 (14-15):35-37).
Nuzhdina N.N., Zhiganov D.A., Ermolaeva T.Ya., Kulevatova T.B., Zlobina L.N., Andreeva L.V. et al. Grain quality indicators and size-dependent fractional composition in winter rye cultivars under the conditions of the Lower Volga region. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(4):153-162. [in Russian] (Нуждина Н.Н., Жиганов Д.А., Ермолаева Т.Я., Кулеватова Т.Б., Злобина Л.Н., Андреева Л.В., Куликова В.А., Салманова Н.А., Нечаев В.Н. Показатели качества и фракционный состав зерна сортов озимой ржи по крупности в условиях Нижнего Поволжья. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(4):153-162). DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-153-162
Ponomareva M.L., Ponomarev S.N. Optimization of grain quality parameters for winter rye breeding. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2019;23(3):320-327. [in Russian] (Пономарева М.Л., Пономарев С.Н Оптимизация параметров качества зерна для селекции озимой ржи. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2019;23(3):320-327). DOI: 10.18699/vj19.496
Shabolkina E.N., Anisimkina N.V. The baking merits of winter rye. *Grain Economy of Russia*. 2017;5(53):32-35. [in Russian] (Шаболкина Е.Н., Анисимкина Н.В. Хлебопекарные достоинства озимой ржи. *Зерновое хозяйство России*. 2017;5(53):32-35).
Urban E.P. Influence of weather conditions of winter rye varieties baking features formation in connection with breeding for purposeful use. *Crop Farming and Plant Growing*. 2015;5(102):8-11. [in Russian] (Урбан Э.П. Влияние погодных условий на формирование хлебопекарных свойств сортов озимой ржи в связи с селекцией на целевое использование. *Земледелие и растениеводство*. 2015;5(102):8-11).
Weather and Climate (Pogoda i klimat): [website]. [in Russian] (Погода и климат: [сайт]). URL: http://www.pogodaiklimat.ru [дата обращения: 16.10.2025].

Информация об авторах

Илья Анатольевич Кибкало, кандидат сельскохозяйственных 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, i.kibkalo@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-8870-121X

Ирина Владимировна Сафонова, кандидат сельскохозяйственных 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, i.safonova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0001-8138-930X

Information about the authors

Ilya A. Kibkalo, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, i.kibkalo@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-8870-121X

Irina V. Safonova, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, i.safonova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0001-8138-930X

Вклад авторов: Кибкало И. А. – проведение лабораторных опытов; систематизация результатов исследования; оформление и написание статьи. Сафонова И. В. – проведение полевых опытов; систематизация результатов исследования; оформление и написание статьи.
Contribution of the authors: Kibkalo I. A. – performing laboratory experiments; systematizing research results; formatting and writing the article. Safonova I. V. – performing field experiments; systematizing research results; formatting and writing the article.

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

Статья поступила в редакцию 01.12.2025; одобрена после рецензирования 30.12.2025; принята к публикации 10.02.2026.
The article was submitted on 01.12.2025; approved after reviewing on 30.12.2025; accepted for publication on 10.02.2026.

КОЛЛЕКЦИИ МИРОВЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СЕЛЕКЦИИ

Научная статья
УДК 633.853.74:631.527.581.6(470.46)
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o4

CC BY

Изучение морфологических и хозяйственно ценных признаков кунжута у образцов коллекции ВИР

Н. В. Кишлян[1], Е. Г. Мягкова[2], Т. В. Шеленга[1]

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

[2] *Прикаспийский аграрный федеральный научный центр Российской Академии наук, Астраханская область, Россия*

Автор, ответственный за переписку: Наталья Васильевна Кишлян, natalya-kishlyan@yandex.ru

Актуальность. Кунжут – *Sesamum indicum* L. (Pedaliaceae Lindl.) – одна из востребованных масличных культур благодаря своим уникальным свойствам: высокому содержанию масла и наличию в нем олеиновой и линолевой жирных кислот в равном соотношении, присутствию природных антиоксидантов, витаминов. Такой состав позволяет использовать кунжут для пищевых и медицинских целей. Однако культура трудоемкая и требует использования ручного труда, так как не все сорта обладают способностью одновременного созревания семян. Изучение и выделение из коллекции ВИР перспективных образцов с нерастрескивающимися, одновременно созревающими коробочками остается актуальной задачей.
Материалы и методы. Коллекционные образцы кунжута изучены по морфологическим и хозяйственно ценным признакам, в том числе содержанию белка, масла и его жирнокислотному составу. В работе использованы среди прочих образцы семян старых лет репродукции (1981–1992). Изучение проводили в течение 2019–2023 гг. Стандарт – сорт ‘Солнечный’. Образцы изучали в полевых условиях Астраханской области в Прикаспийском аграрном федеральном научном центре РАН.
Результаты и обсуждение. Изучено 250 образцов кунжута коллекции ВИР по хозяйственно ценным признакам, для 175 образцов проведена оценка по морфологическим признакам. Установлены содержание масла, белка и состав жирных кислот в 90 образцах. Показано, что содержание масла в образцах кунжута зависит от генотипа и условий выращивания. Выделены лучшие образцы по комплексу хозяйственно ценных признаков. Выявлены образцы с нерастрескивающимися коробочками, которые могут быть использованы в селекции.

Ключевые слова: *Sesamum indicum* L., биологические особенности, продуктивность, урожайность, жирнокислотный профиль

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР 102032421329-8-4.1.1 «Растительные ресурсы масличных и прядильных культур ВИР как основа теоретических исследований и их практического использования» (FGEM-2022-0005).

Для цитирования: Кишлян Н.В., Мягкова Е.Г., Шеленга Т.В. Изучение морфологических и хозяйственно ценных признаков кунжута у образцов коллекции ВИР. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(1):111-122. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o4

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

© Кишлян Н.В., Мягкова Е.Г., Шеленга Т.В., 2026

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

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o4

A study of morphological and important agronomic characteristics in sesame accessions from the VIR collection

Natalya V. Kishlyan[1], Elena G. Myagkova[2], Tatiana V. Shelenga[1]

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

[2] *Caspian Agrarian Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Astrakhan Province, Russia*

Corresponding author: Natalya V. Kishlyan, natalya-kishlyan@yandex.ru

Background. Sesame (*Sesamum indicum* L., fam. Pedaliaceae Lindl.) is one of the sought-after oilseed crops due to its unique properties: high oil content combined with the presence of oleic and linoleic fatty acids, natural antioxidants, and vitamins in the oil. For this reason, sesame seeds are used for food and in pharmacy. However, the crop is labor-intensive and requires manual labor, because not all of its cultivars are able to reach seed maturity simultaneously. There are accessions with nondehiscent seed capsules in the VIR collection. An urgent task is to study the collection and identify promising sesame accessions with this trait.

Materials and methods. Sesame accessions were screened for their morphological and important agronomic characteristics, including the content of protein and oil, and fatty acid composition of the latter. The research material included *inter alia* old seed samples reproduced long ago (1981–1992). The study lasted from 2019 through 2023. Cv. 'Solnechny' served as the reference. Field assessment was performed under the conditions of Astrakhan Province at the Caspian Agrarian Federal Scientific Center.

Results and discussion. Main agronomic indicators were analyzed in 250 sesame accessions from VIR, and morphological characters in 175 accessions. The content of oil, protein, and fatty acids was quantified for 90 accessions. It was shown that oil content in sesame seeds depended on the genotype and growing conditions. The best accessions were selected according to a set of important agronomic indicators. Accessions with nondehiscent capsules were identified for future utilization in breeding practice based on genomic technologies.

Keywords: *Sesamum indicum* L., biological features, productivity, yield, fatty acids

Acknowledgments: the study was accomplished within the framework of the state task according to VIR's thematic plan 102032421329-8-4.1.1 "Plant resources of oil and fiber crops at VIR as the basis for theoretical research and their practical utilization" (FGEM-2022-0005).

For citation: Kishlyan N.V., Myagkova E.G., Shelenga T.V. A study of morphological and important agronomic characteristics in sesame accessions from the VIR collection. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(1):111-122. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o4

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Кунжут (*Sesamum indicum* L., семейство Pedaliaceae Lindl.) является ценной высокомасличной пищевой культурой, благотворно влияющей на здоровье человека. В семенах кунжута содержится 50–65% масла, до 27% белка и 20% растворимых углеводов. Кунжутное масло относится к лучшим пищевым маслам, оно стабильно благодаря присутствию природных антиоксидантов, таких как сезамолин, сезамин и сезамол (Anilakumar et al., 2010). Семена кунжута являются источниками витаминов А, В1, С и Е. Кунжут и его масло используют в качестве лечебно-профилактического питания (Jayaraj et al., 2020). В масле семян кунжута количество ненасыщенных жирных кислот составляет более 82%, в то время как насыщенных жирных кислот – менее 18%. Высокое содержание олеиновой кислоты снижает риск сердечно-сосудистых заболеваний. Линолевая кислота участвует в регуляции липидного обмена, является незаменимой жирной кислотой. Среди ненасыщенных жирных кислот преобладают олеиновая и линолевая кислоты, соотношение их содержания зависит от генотипа образцов: оно может быть почти идеальным, 1 : 1 или с преобладанием одной или другой. Среди насыщенных жирных кислот преобладают пальмитиновая и стеариновая (Yol et al., 2015).

Культура кунжута в мире имеет огромное экономическое значение. В России климатические условия южных регионов Краснодарского края, Астраханской и Ростовской областей позволяют возделывать эту культуру. В Госреестр в настоящее время включены два сорта кунжута: сорт ‘Солнечный’ (создан на Донской опытно-селекционной станции ВНИИ масличных культур имени В.С. Пустовойта) – белосемянный, скороспелый, высокопродуктивный, высокомасличный, районирован с 1993 г., и сорт ‘Визирь’ (получен во ВНИПТИ сорго и кукурузы) – имеет кремовые семена, среднеспелый, устойчивый к засухе, районирован с 2014 г. Одной из проблем возделывания культуры является неравномерное созревание коробочек с семенами на одном растении, что приводит к потерям урожая и затруднению механизированной уборки (Kishlyan et al., 2021), поэтому современная селекция кунжута направлена на создание высокоурожайных сортов с высоким качеством семян и нерастрескивающимися коробочками.

Коллекция кунжута ВИР, представленная экотипами, имеющими разное эколого-географическое происхождение, насчитывает свыше 1560 образцов. Образцы различаются по морфологическим признакам, продолжительности вегетационного периода, продуктивности, содержанию белка, масла и его жирнокислотному составу (ЖКС). *Цель работы*: получение новых данных о биологических особенностях культуры в зоне аридного земледелия РФ, потенциале использования в селекции образцов кунжута из коллекции ВИР, выделение наиболее перспективных образцов для пищевых целей и селекции, в том числе с использованием новых геномных технологий.

Материалы и методы исследования

В работе использованы образцы семян кунжута разного происхождения и разных лет репродукции, включая 1981–1992 гг. (Среднеазиатский филиал ВИР) и 2002–2007 гг. (Волгоградская опытная станция ВИР). Данные семена были включены в выборку после изучения всхожести. По литературным данным, кунжут в течение 30 лет сохраняет всхожесть (Kobayashi, 1986). Проведено изучение 250 образцов кунжута из коллекции ВИР. При изучении в качестве стандарта использовали сорт ‘Солнечный’ (к-1748). Вся выборка охарактеризована по показателям продуктивности (масса 1000 семян, длина вегетационного периода, урожайность), 175 образцов – по морфологическим признакам, 90 – по биохимическим (содержание белка, масла, ЖКС масла). При формировании выборки для исследования изучили всхожесть семян кунжута. Как оказалось, семена в течение 30–35 лет сохраняют всхожесть при хранении в комнатных условиях, в металлических коробках (Kishlyan et al., 2025).

Материал выращивали на полях Прикаспийского аграрного федерального научного центра РАН (ПАФНЦ, Астраханская обл., Черноярский р-н, с. Соленое Займище) в 2019–2023 гг. Посев семян кунжута и уход за растениями проводили согласно «Методическим рекомендациям по возделыванию кунжута в Астраханской области» (Asfandiyarova et al., 2009). Оценку морфологических признаков и продуктивности проводили по «Классификатору вида *Sesamum indicum* L. (кунжут индийский, культурный)» (Vakhrusheva, Ivanenko, 1985) и на основе рекомендаций В. Гильтебрандта в работе «Кунжут» (Hiltebrandt, 1931). Содержание белка, масла и его ЖКС изучали в отделе биохимии и молекулярной биологии ВИР по принятым в ВИР методикам (Shelenga et al., 2025).

ПАФНЦ расположен в зоне полупустынь с экстремально засушливым, жарким летом и малым количеством осадков. Почвенный покров представлен светло-каштановыми, низкоплодородными почвами. По данным лабораторного анализа (Государственный центр агрохимической службы «Астраханский», организация имеет лицензию), содержание гумуса составляет 0,74%. Семена при посеве заделывали рыхлой почвой на глубину 2–4 см. В фазе 2–3 настоящих листьев проводили первое прореживание. В гнезде оставляли 3–4 растения. Через 7–8 дней – второе прореживание с оставлением в гнезде по одному крупному растению. Расстояние между растениями – 14–17 см. Площадь опытных делянок составляла 0,98 м^2 (1,4 × 0,7). Применяли капельное орошение при достижении влажности почвы 70–75% НВ (наименьшая влажность). Ежегодно вносили удобрения в начале вегетации. Погодные условия пяти лет изучения (2019–2023 гг.) были разными. За период изучения самыми жаркими месяцами были: июнь в 2019 г. (26,8°С), июль в 2020 г. (28,0°С) и август в 2021 (28,0°С), 2022 (28,3°С) и 2023 г. (26,9°С). По осадкам наблюдали значительные различия по годам и месяцам вегетации. Наибольшее число осадков выпало в 2019 и 2023 г. В 2020 г. осадков было значительно меньше среднемноголетних значений.

Результаты

Биологические особенности кунжута

Проведено изучение образцов кунжута по комплексу морфологических признаков: «высота растения», «высота штамба» (от поверхности почвы до 1-й ветви), «количество ветвей на стебле», «опушение» и «окраска стебля»; «расположение, опушение и окраска листа», «рассеченность и край листовой пластины»; «окраска венчика цветка», «окраска нижней губы венчика», «наличие антоцианового пятна на венчике»; «количество цветков в пазухе листа», «число коробочек на растении» и «число плодолистиков в коробочке», «число гнезд», «наличие

ложных перегородок в коробочке», «форма коробочки»; «окраска семян». Подробное описание образцов по морфологическим признакам с иллюстрациями приведены в каталоге «Кунжут» (Kishlyan et al., 2025). Высота растений составила 120–170 см, число ветвей на стебле варьировало от 1–2 до 15. Листья верхнего яруса, как правило, узколистные или широколистные. Ранее отмечалось, что узколистные формы более засухоустойчивы (Arzumanova, 1969).

В нашей работе описано большое разнообразие образцов по степени рассеченности листовой пластины среднего яруса стебля. Стебель, как правило, опушенный. Исключения составляют образцы из Индии: к-1021, к-1023, к-1026, к-1027, у которых практически нет опушения стебля. Окраска венчика цветка белая, розовая, светло-розовая, фиолетовая или светло-фиолетовая. Губа венчика белая, слабо- или интенсивно окрашенная. Антоциановое пятно венчика может отсутствовать, быть слабым, интенсивным или крапчатым. Разное количество цветков в пазухе листа: от 1 до 3. Плод кунжута – коробочка удлиненной формы. По данным В. Гильтебрандта (Hiltebrandt, 1931), коробочка образована двумя или четырьмя плодолистиками, края которых загибаются внутрь коробочки, образуя ложные пленчатые перегородки, которые часто остаются недоразвитыми. Кроме удлиненной, коробочка может иметь округло-удлиненную усеченную форму. У таких образцов возможно только принудительное растрескивание коробочек. Образцы с нерастрескивающимися коробочками: к-1620, к-1625, к-1626, к-1627 – из Греции; к-1705, к-1709, к-1710 – из Вьетнама. Еще в середине XX века выявили рецессивное наследование признака нерастрескиваемости коробочек (Langham, 1946). Число коробочек на растении может быть разным, в среднем 100–130 шт. Максимальное число коробочек отмечено у образцов из Греции – к-229 (320 шт.); Узбекистана – к-743 Белосемянный 2046 (367 шт.), к-939 (353 шт.); Таджикистана – к-799 (353 шт.); Китая – к-971 (344 шт.); Индии – к-1060 (338 шт.); Венесуэлы – к-1501 (325 шт.), к-1506 (310 шт.); Кении – к-1855 (313 шт.). У сорта-стандарта ‘Солнечный’ – 366 шт. Выявлен ряд морфологических особенностей у образцов с нерастрескивающимися коробочками: венчик цветка имеет не воронковидную форму, а появляется фасциация лепестков венчика цветка. На ранней стадии роста растений проявляется скрученность листьев, а на оборотной стороне листа могут быть наросты (рисунок).



а) цветок воронковидный / funnel-shaped flowers

б) аномальная форма цветка / abnormally shaped flowers

в) скрученные листья / twisted leaves

Рисунок. Признаки образцов кунжута с нерастрескивающимися коробочками: фасциация лепестков венчика цветка, скрученность листьев на ранней стадии
(2023 г., Прикаспийский аграрный федеральный научный центр РАН)

Figure. Features of sesame accessions with nondehiscent seed capsules: fasciation of flower corolla petals, and twisting of leaves at an early stage
(2023, Caspian Agrarian Federal Research Center of the RAS)

Оценка образцов по хозяйственно ценным признакам

Основными признаками, характеризующими урожайность образцов кунжута, являются продуктивность и масса 1000 семян. При этом желательно, чтобы образец был скороспелым. Характеристика лучших образцов кунжута по хозяйственно ценным признакам за 5 лет приведена в таблице 1. Максимальная урожайность и продуктивность стандарта наблюдалась в 2021 г. За время изучения отмечено 40 образцов с урожайностью выше стандарта. Из них самые высокие показатели продуктивности и урожайности были в 2021 г. у образцов к-1016 (Индия, 45,0 г и 4,6 т/га) и к-1498 (Венесуэла, 46,0 г и 4,7 т/га), в 2023 г. – у к-236 (Греция, о. Родос, 41,7 г и 4,3 т/га).

Высокопродуктивными образцами у кунжута считаются образцы с массой семян с одного растения 26–35 г и более. В эту группу вошло 19 образцов. Наиболее продуктивными оказались образцы к-236 (Греция, о. Родос, 41,7 г); к-1016 (Индия, 45,0 г); к-1457 (Венесуэла, 46,0 г). В ходе исследования выделились крупносемянные образцы кунжута с массой 1000 семян 3,5–3,9 г и более. Это образцы: к-169, к-188 (Турция); к-236, к-380 (Греция, о. Родос); к-486 (Корея); к-743, к-824, к-858 (Узбекистан);

Таблица 1. Характеристика образцов кунжута по хозяйственно ценным признакам
(2019–2023 гг., Прикаспийский аграрный федеральный научный центр РАН)

Table 1. Characterization of sesame accessions according to their important agronomic characteristics
(2019–2023, Caspian Agrarian Federal Research Center of the RAS)

№ по каталогу ВИР	Происхождение образца	Год изучения	Длина вегетационного периода, дни	Продуктивность растения, г	Масса 1000 семян, г	Урожайность, т/га
1748	Россия, 'Солнечный'	2019	103	15,5	2,8	1,6
479	Афганистан	2019	102	13,4	2,8	1,4
745	Египет	2019	120	15,2	2,8	1,5
840	Узбекистан	2019	128	16,0	3,0	1,6
869	Иран	2019	109	15,6	2,8	1,6
870	Иран	2019	102	18,4	2,4	1,9
896	Узбекистан	2019	127	17,4	3,0	1,8
898	Туркмения	2019	109	15,0	2,8	1,5
950	Узбекистан	2019	127	16,0	3,2	1,6
1011	Китай	2019	120	16,1	2,6	1,6
1014	Китай	2019	109	14,0	2,4	1,4
1290	Судан	2019	110	16,0	2,4	1,6
1296	Узбекистан	2019	120	15,1	2,6	1,5
1384	Перу	2019	109	14,0	2,8	1,4
1748	Россия, 'Солнечный'	2020	99	17,0	3,2	1,7
188	Турция	2020	100	30,6	3,5	3,1
239	Греция	2020	101	21,5	3,1	2,2
306	Кипр	2020	93	19,0	3,1	2,0
594	Таджикистан	2020	103	24,1	3,0	2,5
743	Узбекистан	2020	94	31,4	3,5	3,2
756	Узбекистан	2020	100	21,1	2,9	2,2
758	Узбекистан	2020	93	16,4	3,2	1,7
770	Туркмения	2020	97	14,3	3,1	1,5
784	Туркмения	2020	94	19,8	3,1	2,0
820	Уганда	2020	91	32,6	3,0	3,4
826	Узбекистан	2020	94	17,5	3,1	1,8
827	Узбекистан	2020	105	33,4	3,3	3,4
829	Узбекистан	2020	98	18,7	3,1	1,9
831	Узбекистан	2020	98	18,2	3,4	1,9
841	Узбекистан	2020	100	14,1	3,0	1,4
853	Узбекистан	2020	91	20,0	3,0	2,1
854	Узбекистан	2020	87	17,1	2,7	1,8

Таблица 1. Продолжение

Table 1. Continued

№ по каталогу ВИР	Происхождение образца	Год изучения	Длина вегетационного периода, дни	Продуктивность растения, г	Масса 1000 семян, г	Урожайность, т/га
858	Узбекистан	2020	90	16,7	3,5	1,8
859	Корея	2020	95	19,3	3,0	2,0
884	Узбекистан	2020	93	17,3	3,4	1,8
888	Узбекистан	2020	94	16,7	3,1	1,7
901	Туркмения	2020	90	32,6	2,6	3,3
905	Туркмения	2020	92	32,3	3,4	3,3
906	Туркмения	2020	97	23,6	3,1	2,4
910	Туркмения	2020	92	19,1	3,1	2,0
1213	Афганистан	2020	90	13,9	3,3	1,5
1506	Венесуэла	2020	100	24,7	3,3	2,5
1846	Кения	2020	92	19,4	2,7	2,0
1748	Россия, ‘Солнечный’	2021	95	26,1	3,2	2,7
913	Туркмения	2021	105	31,9	3,2	3,2
977	Китай	2021	100	28,5	3,5	3,9
985	Китай	2021	72	33,0	3,3	3,4
1016	Индия	2021	79	45,0	2,8	4,6
1033	Мексика	2021	112	30,5	2,9	3,1
1038	Мексика	2021	112	22,7	3,1	2,9
1040	Мексика	2021	90	37,0	3,0	3,8
1457	Венесуэла	2021	98	36,0	3,4	3,7
1475	Венесуэла	2021	84	27,0	2,9	2,8
1498	Венесуэла	2021	95	46,0	3,0	4,7
1748	Россия, ‘Солнечный’	2022	93	16,1	3,0	1,6
15	Узбекистан	2022	118	21,9	2,2	2,2
105	Узбекистан	2022	121	39,0	2,8	4,0
115	Узбекистан	2022	114	23,4	2,7	2,4
218	Турция	2022	114	22,8	3,2	2,3
328	Эфиопия	2022	102	18,0	3,1	1,8
359	Африка, Эритрея	2022	100	23,5	2,2	2,4
372	Турция	2022	109	28,0	3,1	2,9
435	Япония	2022	–	38,2	2,7	3,9
452	Индия	2022	109	22,5	2,8	2,3
475	Афганистан	2022	123	22,6	2,6	2,3

Таблица 1. Окончание

Table 1. The end

№ по каталогу ВИР	Происхождение образца	Год изучения	Длина вегетационного периода, дни	Продуктивность растения, г	Масса 1000 семян, г	Урожайность, т/га
483	Индия	2022	123	38,9	3,2	4,0
486	Корея	2022	116	32,3	3,5	3,3
488	Зап. Китай	2022	109	23,6	3,1	2,4
489	Корея	2022	116	29,2	2,5	3,0
900	Туркмения	2022	96	20,6	2,9	2,1
1061	Индия	2022	–	27,2	3,1	2,8
1188	Марокко	2022	–	17,7	2,7	1,8
1209	Индия	2022	111	18,0	3,4	1,8
1626	Греция	2022	155	4,8	3,0	1,8
1748	Россия, ‘Солнечный’	2023	105	13,7	3	1,4
69	Армения	2023	126	24,4	3,2	2,5
119	Узбекистан	2023	102	16,2	3,2	1,6
138	Армения	2023	126	21,1	2,9	2,2
169	Турция	2023	119	15,4	3,5	1,6
204	Турция	2023	126	37,2	3,2	3,8
210	Турция	2023	109	22,3	3,0	2,3
230	Греция, о. Родос	2023	106	15,7	3,0	1,6
236	Греция, о. Родос	2023	112	41,7	3,9	4,3
237	Греция, о. Родос	2023	119	17,2	3,2	1,8
380	Греция, о. Родос	2023	117	21,0	3,5	2,1
382	Узбекистан	2023	122	17,9	3,1	1,8
454	Индия	2023	109	18,0	3,4	1,8
594	Таджикистан	2023	108	15,8	2,8	1,6
1045	Мексика	2023	112	18,1	3,4	1,8
1281	ЮАР	2023	92	18,1	3,4	1,8
1506	Венесуэла	2023	99	15,0	2,2	1,5
1617	Греция	2023	112	21,0	3,0	2,1
1628	Греция	2023	122	19,1	3,1	1,9
1713	Вьетнам	2023	109	14,4	3,2	1,9
1722	Вьетнам	2023	109	16,1	2,9	1,6
1767	Россия	2023	112	15,8	2,8	1,6
1846	Кения	2023	99	14,9	3,1	1,5
1855	Кения	2023	99	20,1	3,5	2,0

к-977 (Китай); к-1855 (Кения). Группу скороспелых составили восемь образцов. Самый короткий вегетационный период отмечали у образцов к-985 (Китай, 72 дн.) и к-1016 (Индия, 79 дн.). Скороспелые образцы также проявили высокую продуктивность и урожайность.

Биохимическое исследование состава жирных кислот в масле и содержание белка и масла у образцов кунжута

Образцы кунжута оценивали по содержанию белка, масла и его жирнокислотному составу (ЖКС). Преобладающими в масле у кунжута являются ненасыщенные жирные кислоты: олеиновая (С18:1) и линолевая (С18:2). Соотношение этих двух кислот в кунжутном масле (1 : 1) обусловливает его высокое качество. Такое соотношение обнаружено у образцов: к-135 (Армения); к-758, к-765, к-831, к-897 (Узбекистан); к-770, к-906 (Туркмения); к-795, к-796, к-804, к-808 (Таджикистан); к-981 (Китай); к-1079 (Индия); к-1093 (Судан); к-1182 (Япония); к-1213 (Афганистан); к-1558 (Турция); к-1767 (Россия, ВНИИМК) (табл. 2).

Среди насыщенных жирных кислот наиболее представленными в ЖКС были пальмитиновая и стеариновая. Размах изменчивости содержания пальмитиновой

Таблица 2. Характеристика образцов кунжута по содержанию масла, белка и составу жирных кислот, репродукции 2019, 2020, 2023 г. (Прикаспийский аграрный федеральный научный центр РАН)

Table 2. Characterization of sesame accessions according to their oil and protein content, and fatty acid composition; reproductions of 2019, 2020, and 2023 (Caspian Agrarian Federal Research Center of the RAS)

№ по каталогу ВИР	Происхождение	C16:0	C18:0	C18:1	C18:2	Масло	Белок
2019							
1748	Россия, ‘Солнечный’	10,11	6,57	43,56	37,18	40,39	24,38
479	Афганистан	6,46	5,72	58,65	27,35	41,14	21,44
745	Египет	8,03	5,42	49,63	33,67	39,16	21,82
785	Туркмения	9,07	6,60	46,17	36,79	37,61	24,08
840	Узбекистан	8,58	5,20	47,86	36,42	37,40	23,27
869	Иран	9,83	6,51	45,79	36,38	41,39	23,05
870	Иран	8,95	5,51	48,59	34,19	39,44	23,83
896	Узбекистан	8,59	6,08	49,45	35,17	37,79	24,38
897	Узбекистан	9,31	6,68	41,22	40,93	40,24	23,32
898	Туркмения	9,73	7,06	41,08	38,94	39,07	24,21
900	Туркмения	9,32	6,38	44,96	36,42	37,80	24,23
914	Туркмения	9,51	5,26	42,48	39,21	37,07	24,04
923	Болгария	6,90	3,74	45,02	41,98	38,14	24,19
981	Китай	9,54	6,23	40,09	40,69	37,78	23,66
1011	Китай	9,43	5,46	43,56	38,43	38,92	24,62
1014	Китай	9,28	5,41	44,23	37,55	38,23	24,17
1069	Индия	10,43	6,81	41,84	38,35	37,72	23,01
1079	Индия	10,50	6,66	39,60	40,83	39,16	24,20
1093	Судан	7,76	5,22	40,50	40,62	35,15	20,58
1216	Афганистан	9,91	6,62	37,39	40,61	39,20	23,53
1290	Судан	9,72	6,54	40,77	37,73	36,22	24,53
1296	Узбекистан	10,15	6,50	37,74	41,77	36,70	25,05
1384	Перу	9,98	6,44	38,03	40,52	40,10	25,46
1416	Венесуэла	9,93	6,41	38,58	40,88	39,06	25,09
1425	Венесуэла	9,68	6,21	39,71	38,35	38,09	23,95

Таблица 2. Продолжение
Table 2. Continued

№ по каталогу ВИР	Происхождение	C16:0	C18:0	C18:1	C18:2	Масло	Белок
1430	Венесуэла	7,79	5,95	42,65	35,99	37,80	24,70
1431	Венесуэла	10,23	6,93	36,63	43,14	41,45	24,75
1436	Венесуэла	10,05	7,21	36,00	43,73	38,66	24,82
1515	Венесуэла	9,27	5,86	39,84	38,32	39,29	24,79
1558	Турция	7,75	5,99	40,96	40,45	38,76	24,91
2020							
1748	Россия, ‘Солнечный’	9,53	3,97	42,74	40,49	43,51	23,76
158	Турция	10,34	4,55	37,88	44,50	45,05	22,58
747	Туркмения	8,53	5,43	40,48	42,90	43,19	23,04
750	Туркмения	10,05	5,40	38,26	43,73	44,72	21,22
754	Узбекистан	10,23	5,93	38,46	42,52	46,72	20,86
756	Узбекистан	10,09	5,58	38,73	42,84	45,42	19,24
758	Узбекистан	10,35	4,42	40,91	41,50	45,28	20,03
759	Узбекистан	10,34	3,50	42,28	40,99	44,03	20,79
763	Узбекистан	10,32	3,31	42,50	41,02	42,69	21,01
765	Узбекистан	10,89	4,06	41,28	40,79	45,00	19,70
770	Туркмения	10,44	4,72	40,61	41,22	44,58	20,19
795	Таджикистан	10,06	4,79	41,03	41,14	44,58	20,15
796	Таджикистан	10,16	5,92	39,59	41,45	45,08	20,47
804	Таджикистан	10,25	5,68	39,70	41,36	44,35	21,50
808	Таджикистан	10,51	2,66	41,86	41,75	45,61	20,79
820	Уганда	10,38	4,17	40,78	41,55	40,36	21,79
824	Узбекистан	10,51	3,49	41,18	42,03	45,44	19,06
831	Узбекистан	10,51	3,78	41,23	41,46	45,10	20,21
836	Узбекистан	10,86	2,81	40,94	42,32	45,16	20,17
841	Узбекистан	10,65	6,03	37,59	41,92	44,53	20,16
845	Узбекистан	10,99	5,67	38,18	39,90	45,78	19,80
854	Узбекистан	10,19	6,06	38,61	41,29	44,00	20,82
855	Узбекистан	9,10	5,40	39,68	42,24	45,49	20,37
859	Корея	10,09	5,36	40,15	41,28	44,66	22,47
888	Узбекистан	10,16	6,49	38,89	41,08	44,43	20,41
906	Туркмения	10,39	2,87	41,82	41,43	45,00	21,01
910	Туркмения	10,40	3,15	41,99	41,26	42,42	21,54

Таблица 2. Окончание
Table 2. The end

№ по каталогу ВИР	Происхождение	C16:0	C18:0	C18:1	C18:2	Масло	Белок
1080	Индия	10,04	5,36	39,52	40,54	38,27	19,10
1213	Афганистан	10,06	4,20	41,18	41,46	43,36	21,12
1245	Бразилия	9,58	6,83	38,80	41,24	43,11	22,04
2023							
1748	Россия, ‘Солнечный’	14,75	8,92	35,77	36,02	40,76	23,23
69	Армения	11,63	4,42	30,47	51,08	34,76	22,39
135	Армения	17,50	5,42	37,11	36,91	34,27	21,71
151	Иран	16,94	5,35	37,60	36,96	35,85	21,78
169	Турция	15,76	5,68	36,86	39,21	35,43	22,25
188	Турция	18,15	6,94	38,41	32,85	38,12	22,70
237	о. Родос	17,12	5,41	37,97	36,87	38,01	22,11
239	о. Родос	17,53	6,45	42,01	31,44	38,37	22,93
241	о. Родос	16,30	5,58	38,39	37,44	38,46	22,01
303	Армения	16,33	5,21	38,47	37,49	36,95	21,54
309	о. Кипр	15,47	5,44	39,05	37,60	37,87	22,03
382	Узбекистан	11,24	3,41	24,69	57,89	36,98	22,04
442	Япония	16,34	5,43	38,73	36,69	38,87	22,90
454	Индия	17,98	6,40	38,10	33,99	36,98	21,26
594	Таджикистан	15,55	5,64	38,81	37,51	36,71	23,15
1045	Мексика	16,27	5,53	38,25	37,66	38,62	23,34
1182	Япония	15,19	5,11	38,90	38,24	44,98	21,62
1247	ЮАР	14,79	4,20	29,97	47,94	37,07	22,79
1249	ЮАР	16,22	5,50	38,87	36,98	38,23	23,07
1506	Венесуэла	16,55	5,50	38,34	36,58	37,32	22,60
1617	Греция	11,57	3,63	35,92	45,46	38,46	23,00
1620	Греция	10,43	3,53	34,95	48,67	40,10	24,48
1621	Греция	12,78	5,97	34,66	43,40	39,27	23,01
1622	Греция	12,94	4,41	33,94	45,76	40,01	23,72
1628	Греция	14,52	5,66	38,03	39,23	39,96	23,53
1713	Вьетнам	16,65	5,36	39,56	35,55	41,53	22,55
1767	ВНИИМК	14,22	5,80	37,81	38,27	40,28	23,72
1846	Кения	20,03	5,21	39,30	31,64	35,88	21,95
1855	Кения	17,90	7,12	41,22	30,24	37,90	22,51
1722	Вьетнам	16,01	6,27	35,72	39,71	38,37	23,51

кислоты у изученных образцов – от 6,46% до 10,50%, стеариновой – от 2,81 до 7,21%. Остальные кислоты имели более низкое содержание. Содержание масла в образцах кунжута репродукций 2019–2023 гг. на уровне стандарта и выше отмечено у 15 образцов, с максимальными значениями в 2020 г. для к-754 (Узбекистан) – 46,72%; к-845 (Узбекистан) – 45,78 %; к-808 (Таджикистан) – 45,61 %; к-824 (Узбекистан) – 45,44%; к-756 (Узбекистан) – 45,42%; к-758 (Узбекистан) – 45,28%; к-796 (Таджикистан) – 45,08%; к-158 (Турция) – 45,05%; к-906 (Туркмения) – 45,00%.

За время изучения диапазон изменчивости содержания белка составил 19–24%, образцов с показателями, превышающими стандарт, не выделено.

Обсуждение

В настоящем исследовании всесторонне изучены коллекционные образцы кунжута по морфологическим и хозяйственно ценным признакам, включая содержание белка, масла и его ЖКС. Изучение морфологических признаков образцов коллекции кунжута дает представление о биологических особенностях культуры и потенциале использования в селекции. По литературным данным, в семенах кунжута может содержатся до 50–65% масла, до 27% белка. По данным оценки коллекции образцов семян кунжута, выращивавшихся ранее в Среднеазиатском филиале ВИР, выявлены высокомасличные формы с содержанием масла до 63%. Содержание масла, по данным авторов (Yarosh, Ivanenko, 1984), у образцов кунжута зависит от генотипа, места выращивания, климатических условий. Было показано, что повышение температуры в период формирования семян и образования масла положительно сказалось на биосинтезе олеиновой кислоты и отрицательно – на линолевой. При этом наиболее масличными оказались образцы из Узбекистана, Таджикистана и Туркмении. При изучении 369 образцов кунжута в Китае содержание масла колебалось от 27,9 до 58,7% (Li et al., 2014). По данным авторов из Эфиопии (Agidew et al., 2021), содержание масла в семенах кунжута составило от 47,6 до 58,2%. В ЖКС масла кунжута среди ненасыщенных ЖК преобладали линолевая (42,5–44,3%) и олеиновая кислоты (37,2–38,9%). Среди насыщенных ЖК – пальмитиновая (9,35–11,2%) и стеариновая (5,78–6,52%). ЖКС согласуется с полученными нами данными: содержание масла у образцов репродукций 2019–2023 г. в условиях Астраханской области (ПАФНЦ РАН) было значительно ниже. В настоящем исследовании выявлено, что наиболее высокие показатели содержания масла у стандарта ‘Солнечный’ пришлись на 2020 г. – 43,51%. При этом максимальное содержание масла установлено у образцов из Узбекистана (к-754 – 46,72%; к-845 – 45,78%; к-855 – 45,49%) и Турции (к-158 – 45,05%). Содержание линолевой кислоты у этих образцов (39,90–44,50%) преобладало над олеиновой (37,59–42,74%). При оценке хозяйственно ценных признаков выявлено большое разнообразие образцов по продуктивности, урожайности, массе 1000 семян и продолжительности вегетационного периода.

Заключение

По результатам проведенной работы получены новые данные о биологических особенностях культуры в зоне аридного земледелия РФ и потенциале использования образцов кунжута из коллекции ВИР в селекции. Выделены перспективные раннеспелые образцы кунжута с высокой продуктивностью и урожайностью: к-188 (Турция), к-820 (Уганда), к-901, к-905 (Туркмения), к-985 (Китай), к-1016 (Индия), к-1040 (Мексика), к-1457, к-1498 (Венесуэла); с высоким содержанием масла: к-754, к-824, к-845, к-756, к-758 (Узбекистан), к-808, к-796 (Таджикистан), к-158 (Турция), к-906 (Туркмения); оптимальным соотношением ненасыщенных ЖК в масле: к-135 (Армения); к-758, к-765, к-831, к-897 (Узбекистан); к-770, к-906 (Туркмения); к-795, к-796, к-804, к-808 (Таджикистан); к-981 (Китай); к-1079 (Индия); к-1093 (Судан); к-1182 (Япония); к-1213 (Афганистан); к-1558 (Турция); к-1767 (Россия, ВНИИМК). Образцы с нерастрескивающимися коробочками: к-1620, к-1625, к-1626, к-1627 (Греция), к-1705, к-1709, к-1710 (Вьетнам) для целей селекции.

References / Литература

Agidew M.G., Dubale A.A., Atlabachew M., Abebe W. Fatty acid composition, total phenolic contents and antioxidant activity of white and black sesame seed varieties from different localities of Ethiopia. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. 2021;8(14):14. DOI: 10.1186/s40538-021-00215-w

Anilakumar K.R., Pal A., Khanum F., Bawa A.S. Nutritional, medicinal and industrial uses of sesame (*Sesamum indicum* L.) seeds. *Agriculturae Conspectus Scientificus*. 2010;75(4):159-168.

Arzumanova A.M. Catalogue of the VIR global collection. Issue 41. Sesame and peanut. I.A. Sizov (ed.). Leningrad: VIR; 1969. [in Russian] (Арзуманова А.М. Каталог мировой коллекции ВИР. Выпуск 41. Кунжут и арахис / под ред. И.А. Сизова. Ленинград: ВИР; 1969).

Asfandiyarova M.Sh., Tuz R.K., Dubovskaya A.G. Guidelines for sesame cultivation in Astrakhan Province (Metodicheskiye rekomendatsii po vozdelyvaniyu kunzhuta v Astrakhanskoy oblasti). Moscow; 2009. [in Russian] (Асфандиярова М.Ш., Туз Р.К., Дубовская А.Г. Методические рекомендации по возделыванию кунжута в Астраханской области. Москва; 2009).

Hiltebrandt V.M. Sesame (Kunzhut). Leningrad: VIR; 1931. [in Russian] (Гильтебрандт В.М. Кунжут. Ленинград: ВИР; 1931).

Jayaraj P., Narasimhulu C.A., Rajagopalan S., Parthasarathy S., Desikan R. Sesamol: A powerful functional food ingredient from sesame oil for cardioprotection. *Food and Function*. 2020;11:1198-1210. DOI: 10.1039/c9fo01873e

Kishlyan N.V., Asfandiyarova M.Sh., Yakusheva T.V., Dubovskaya A.G. Biological features and cultivation of sesame (a review). *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021;182(4):156-165). DOI: 10.30901/2227-8834-2021-4-156-165. [in Russian] (Кишлян Н.В., Асфандиярова М.Ш., Якушева Т.В., Дубовская А.Г. Биологические особенности и возделывание кунжута (обзор). *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2021;182(4):156-165). DOI: 10.30901/2227-8834-2021-4-156-165

Kishlyan N.V., Shelenga T.V., Asfandiyarova M.Sh., Dubovskaya A.G., Myagkova E.G. Catalogue of the VIR global collection. Issue 945. Sesame: Characteristics of accessions from the VIR collection under conditions of the Astrakhan region. St. Petersburg: VIR; 2025. [in Russian] (Кишлян Н.В., Шеленга Т.В., Асфандиярова М.Ш., Дубовская А.Г., Мягкова Е.Г. Каталог мировой коллекции ВИР. Выпуск 945. Кунжут: Характеристика коллек-

ционных образцов ВИР в условиях Астраханской области. Санкт-Петербург: ВИР; 2025).

Kobayashi T. Goma no kita michi (Sesame road). In: *Iwanami-shoten*. Tokyo; 1986. p.153-155. [in Japanese]

Langham D.G. Genetics of sesame: III. "Open sesame" and mottled leaf. *Journal of Heredity*. 1946;37(5):149-152. DOI: 10.1093/oxfordjournals.jhered.a105603

Li C., Miao H., Wei L., Zhang T., Han X., Zhang H. Association mapping of seed oil and protein content in *Sesamum indicum* L. using SSR markers. *PLoS ONE*. 2014;9(8):e105757. DOI: 10.1371/journal.pone.0105757

Shelenga T.V., Solovyeva A.E., Sokolova D.V., Vasipov V.V., Smolenskaya A.E., Popov V.S. Rapid assessment of biochemical indicators of agronomic value in amaranth seed accessions from the VIR collection using NIR spectroscopy. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(1):52-60. [in Russian] (Шеленга Т.В., Соловьева А.Е., Соколова Д.В., Васипов В.В., Смоленская А.Е., Попов В.С. Экспресс-оценка биохимических показателей хозяйственной ценности образцов семян амаранта из коллекции ВИР с помощью БИК-спектроскопии. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(1):52-60). DOI: 10.30901/2227-8834-2025-1-52-60

Vakhrusheva T.E., Ivanenko E.N. Descriptor list for *Sesamum indicum* L. (Indian sesame, cultivated) (Klassifikator vida *Sesamum indicum* L. [kunzhut indiyskiy, kulturny]). Leningrad: VIR; 1985. [in Russian] (Вахрушева Т.Е., Иваненко Е.Н. Классификатор вида *Sesamum indicum* L. (кунжут индийский, культурный). Ленинград: ВИР; 1985).

Yarosh N.P., Ivanenko E.N. Fatty acids and oil content of sesame seeds of various ecological types. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 1984;88:48-54. [in Russian] (Ярош Н.П., Иваненко Е.Н. Жирные кислоты и масличность семян кунжута различных экологических типов. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1984;88:48-54).

Yol E., Toker T., Golukcu M., Uzun B. Oil content and fatty acid characteristics in Mediterranean sesame core collection. *Crop Science*. 2015;55(5):2177-2185. DOI: 10.2135/cropsci2014.11.0771

Информация об авторах

Наталья Васильевна Кишлян, 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, natalya-kishlyan@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-4454-6948

Елена Георгиевна Мягкова, научный сотрудник, Прикаспийский аграрный федеральный научный центр Российской академии наук, 416251 Россия, Астраханская обл., Черноярский р-н, с. Соленое Займище, кв. Северный, 8, govsan29@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0631-9253

Татьяна Васильевна Шеленга, 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, tatianashelenga@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-3992-5353

Information about the authors

Natalya V. Kishlyan, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, natalya-kishlyan@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-4454-6948

Elena G. Myagkova, Researcher, Caspian Agrarian Federal Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 8 Severny Block, Solenoe Zaimishche, Chernoyarsky District, Astrakhan Province 416251, Russia, govsan29@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0631-9253

Tatiana V. Shelenga, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, tatianashelenga@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-3992-5353

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 16.09.2025; одобрена после рецензирования 03.10.2025; принята к публикации 28.10.2025.
The article was submitted on 16.09.2025; approved after reviewing on 03.10.2025; accepted for publication on 28.10.2025.

КОЛЛЕКЦИИ МИРОВЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СЕЛЕКЦИИ

Научная статья
УДК 633.366(470.620)
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o10

CC BY

Селекционный потенциал образцов донника из коллекции ВИР в условиях Северного Кавказа

Ю. А. Просвирин[1], О. В. Дук[2], В. В. Чумакова[3]

[1] *Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Кубанская опытная станция – филиал ВИР, Краснодарский край, Россия*

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

[3] *Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр, Михайловск, Россия*

Автор, ответственный за переписку: Ольга Владимировна Дук, duk-olg@yandex.ru

Актуальность. Донник (*Melilotus* Mill.) – ценная кормовая, фитомелиоративная, медоносная и лекарственная культура, отличается засухоустойчивостью, зимостойкостью, солеустойчивостью, имеет широкий ареал. Для создания высокопродуктивных сортов донника, адаптированных к условиям Северного Кавказа, необходим исходный материал, отвечающий задачам селекции.
Материалы и методы. По методическим указаниям ВИР и классификатору рода *Melilotus* на Кубанской опытной станции ВИР проведен скрининг образцов из коллекции донника. Изучали наиболее распространенные и продуктивные виды *M. albus* Medik. и *M. officinalis* (L.) Pall., а также перспективные для использования в селекции *M. dentatus* (Waldst. et Kit.) Desf., *M. wolgicus* Poir. и *M. tauricus* (M. Bieb.) Ser. Статистическая обработка результатов исследования выполнена методами базовой статистики, дисперсионного, корреляционного и факторного анализов.
Результаты. Выделены образцы донника, превысившие стандарт по урожайности зеленой и воздушно-сухой массы, облиственности и высоте растений. Выявлена факторная структура изменчивости селекционно ценных признаков. Найдены образцы, перспективные для использования в селекции в качестве источников селекционно ценных признаков: 1) урожайности зеленой массы – дикорастущие *M. wolgicus* из Венгрии (к-40146), *M. albus* из Таджикистана (к-31403) и Израиля (к-43714); 2) урожайности воздушно-сухой массы – дикорастущие образцы *M. wolgicus* из Венгрии (к-40146) и *M. albus* из Канады (к-1006); 3) высокорослости – дикорастущие *M. albus* из Канады (к-1006) и сорт этого же вида ‘Bokros’ из Венгрии (к-30495); 4) высокой облиственности растений – дикорастущий образец *M. officinalis* из Саратовской области (к-10277).
Заключение. Оценка селекционного потенциала образцов донника из коллекции ВИР позволила выявить новые источники селекционно ценных признаков, адаптированные к условиям Северного Кавказа.

Ключевые слова: Краснодарский край, *Melilotus*, источники и изменчивость селекционно ценных признаков

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту: FGEM-2022-0002 «Выявление возможностей генофонда бобовых культур для оптимизации их селекции и диверсификации использования в различных отраслях народного хозяйства».

Для цитирования: Просвирин Ю.А., Дук О.В., Чумакова В.В. Селекционный потенциал образцов донника из коллекции ВИР в условиях Северного Кавказа. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(1):123-139. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o10

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

© Просвирин Ю.А., Дук О.В, Чумакова В.В., 2026

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

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o10

Breeding potential of sweet clover accessions from the VIR collection under the conditions of the North Caucasus

Yuri A. Prosvirin[1], Olga V. Duk[2], Vera V. Chumakova[3]

[1] *N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Kuban Experiment Station – branch of VIR, Krasnodar Territory, Russia*

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

[3] *North-Caucasian Federal Scientific Agrarian Center, Mikhailovsk, Russia*

Corresponding author: Olga V. Duk, duk-olg@yandex.ru

Background. Sweet clover is a valuable fodder, phytomeliorative, melliferous, and medicinal crop. It is drought-resistant, winter-hardy, salt-tolerant, and has a wide range of distribution. To develop highly productive sweet clover cultivars adapted to the conditions of the North Caucasus, it is necessary to have source material that meets the requirements of breeding.
Materials and methods. Sweet clover accessions from the VIR collection were screened at the Kuban Experiment Station of VIR in accordance with VIR's guidelines for studying the collection of perennial forage plants and the list of descriptors for the genus *Melilotus* Mill. The study was focused on the most common and productive species: *M. albus* Medik., and *M. officinalis* (L.) Pall., as well as on a number of species promising for breeding: *M. dentatus* (Waldst. et Kit.) Desf., *M. wolgicus* Poir., and *M. tauricus* (M. Bieb.) Ser. Statistical processing of the research results was performed using basic statistics, analysis of variance, correlation and factor analyses.
Results. Sweet clover accessions that exceeded the reference in the yield of green and air-dry biomass, leafiness, and plant height were selected. The factor structure was specified for the variability of traits valuable for breeding. Accessions promising as potential sources of such traits were identified: 1) for green biomass yield, wild *M. wolgicus* from Hungary (k-40146), and *M. albus* from Tajikistan (k-31403) and Israel (k-43714); 2) for air-dry biomass yield, wild *M. wolgicus* from Hungary (k-40146) and *M. albus* from Canada (k-1006); 3) for greater plant height, wild *M. albus* from Canada (k-1006), and cv. 'Bokros' from Hungary (k-30495); 4) for higher leafiness, a wild specimen of *M. officinalis* from Saratov Province (k-10277).
Conclusion. The assessment of the breeding potential in sweet clover accessions from the VIR collection helped to identify new sources of valuable traits adapted to the conditions of the North Caucasus.

Keywords: Krasnodar Territory, *Melilotus*, sources and variability of agronomic traits

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the state task in accordance with the thematic plan of VIR for Project No. FGEM-2022-0002 "Identifying possibilities in the genetic diversity of leguminous crops to optimize their breeding and diversify uses in various sectors of the national economy".

For citation: Prosvirin Yu.A., Duk O.V., Chumakova V.V. Breeding potential of sweet clover accessions from the VIR collection under the conditions of the North Caucasus. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(1):123-139. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o10

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Донник (*Melilotus* Mill.) относится к семейству Fabaceae Lindl., трибе Trifolieae Endl. (клеверные), характеризуется универсальностью использования: ценная кормовая, фитомелиоративная, медоносная и лекарственная культура. Виды этого рода малотребовательны к плодородию почв. Отличаются засухоустойчивостью, зимостойкостью, солеустойчивостью. На засоленных почвах донник в 10–20 раз превосходит по урожайности многолетние травы, является рассолителем и обогащает почвы азотом (Suvorov, 1962; Riksen et al., 2024; Yushkevich et al., 2025).

Донник белый (*M. albus* Medik.) и донник желтый (*M. officinalis* (L.) Pall.) распространены практически во всех растительных зонах РФ. Наибольшее разнообразие видов сосредоточено в степной зоне Кавказа, а также в среднегорной, где они встречаются на высоте до 2200 м н. у. м. (Suvorov, 1950, 1962).

Учитывая уникальные свойства донника, эта культура незаменима для освоения малопродуктивных, особенно горных, солонцовых и солончаковых почв. Н. И. Вавилов, изучая земледелие Канады, обратил внимание на донник как на культуру, наиболее быстро осваивающую поле и заслуживающую всемерного использования (Vavilov, 1987).

В настоящее время в культуру введены шесть видов донника: *M. albus*, *M. officinalis*, *M. dentatus* (Waldst. et Kit.) Desf., *M. wolgicus* Poir., *M. hirsutus* Lipsky, *M. suaveolens* Ledeb., из них четыре (*M. dentatus*, *M. wolgicus*, *M. hirsutus*, *M. suaveolens*) – относительно недавно. *M. dentatus* (донник зубчатый, или солончаковый) введен в культуру в Атырауском филиале Юго-Западного НИИ животноводства и растениеводства, где создан первый сорт донника зубчатого – ‘Сарайшик’ (Mukhambetov, 2009). Первый сорт *M. wolgicus* (донник волжский) ‘Карлыбас’ создан в НПЦ зернового хозяйства им. А.И. Бараева (Parsaev at al., 2020). Общеизвестно, что многие дикорастущие виды рода представляют интерес для селекции кормовых трав и кормопроизводства (Suvorov, 1950). Вовлечение разнообразного исходного материала, собранного в природных местообитаниях на территории нашей страны и хранящегося в коллекции ВИР, позволит ускорить выведение сортов с заданными свойствами для различных регионов и направлений использования культуры.

Для создания высокопродуктивных сортов донника, адаптированных к условиям Северного Кавказа, необходим исходный материал, отвечающий задачам селекции. Особый интерес представляют уникальные образцы коллекции донника, имеющие биологический статус дикорастущих и обладающие высокой экологической устойчивостью. *Цель исследования* – раскрытие селекционного потенциала образцов донника из коллекции ВИР путем скрининга в условиях Северного Кавказа и выявление образцов, перспективных для использования в качестве источников селекционно ценных признаков.

Материалы и методы

На Кубанской опытной станции ВИР (Краснодарский край) в 2018–2019 гг. проведен скрининг 26 образцов двулетних видов донника из коллекции ВИР различного происхождения, представленных не только наиболее распространенными и продуктивными видами – донником белым (*M. albus*) и донником желтым (*M. officinalis*), но и перспективными для селекции донником зубчатым (*M. dentatus*), донником волжским (*M. wolgicus*) и донником крымским (*M. tauricus* (M. Bieb.) Ser.).

Донник зубчатый отличается солеустойчивостью и низким содержанием кумарина, донник волжский – тонкостебельностью, засухоустойчивостью и зимостойкостью. Донник крымский характеризуется высокой облиственностью, низким содержанием кумарина и устойчивостью к мучнистой росе (Bobrov, 1945; Suvorov, 1962; Ivanov et al., 1984).

В исследовании находились 19 дикорастущих образцов и 7 селекционных сортов двулетних видов донника из коллекции ВИР. Паспортные данные образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Паспортные данные изучаемых образцов донника (*Melilotus* Mill.)
Table 1. Passport data of the studied sweet clover (*Melilotus* Mill.) accessions

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Название / Name	Происхождение / Origin
Донник белый (*M. albus* Medik.)		
1006	Дикорастущий	Канада
2205	Дикорастущий	Воронежская область
30495	‘Bokros’	Венгрия
31403	Дикорастущий	Таджикистан
38872	‘Шедевр 75’	Казахстан
43580	Дикорастущий	Читинская область
43714	Дикорастущий	Израиль
44075	‘Приморский 74’	Приморский край
48542	Дикорастущий	Австралия

Таблица 1. Окончание
Table 1. The end

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Название / Name	Происхождение / Origin
Донник желтый (*M. officinalis* (L.) Pall.)		
10277	Дикорастущий	Саратовская область
13397	Дикорастущий	Украина
36675	‘Малокумаринный’	США
36680	‘Малокумаринный’	США
38048	Дикорастущий	Казахстан
38632	Дикорастущий	США
39369	Дикорастущий	Азербайджан
50134	Дикорастущий	Узбекистан
52290	‘Ишимский Ранний’	Казахстан
53263	‘Донче’	Ставропольский край
Донник зубчатый (*M. dentatus* Waldst. et Kit.) Desf.)		
30502	Дикорастущий	Украина
31135	Дикорастущий	Челябинская область
31520	Дикорастущий	Курганская область
Донник волжский (*M. wolgicus* Poir.)		
40146	Дикорастущий	Венгрия
40965	Дикорастущий	Чехословакия
50831	Дикорастущий	Германия
Донник крымский (*M. tauricus* (M. Bieb.) Ser.)		
9372	Дикорастущий	Крым

Анализ образцов коллекции донника проводили в соответствии с методическими указаниями по изучению коллекции многолетних кормовых растений (Ivanov et al., 1985), которые применимы для двулетних видов, и классификатором рода *Melilotus* Mill. (Ivanov et al., 1988).

В качестве стандарта для всех видов использовали сорт донника желтого ‘Донче’ селекции Северо-Кавказского федерального научного аграрного центра и Ставропольского государственного аграрного университета (к-53263). Сорт включен в Госреестр и используется по всей территории РФ (https://gossortrf.ru/registry).

Перед закладкой питомника изучения образцов коллекции донника обработка поля включала типичные для данной зоны агротехнические приемы, такие как вспашка, дискование, фрезерная культивация и прикатывание. При уходе за посевами применялись обработка почвы мотоблоком и ручная прополка. Семена перед посевом скарифицировались. Питомник заложен в 4-кратной повторности, площадь делянки – 1,4 м^2, норма высева семян – 2 г/м^2, глубина заделки – 2 см. Посев проводили вручную 25 апреля, когда в почве было достаточное количество влаги.

Образцы оценивали по основным селекционно ценным признакам: урожайности зеленой и воздушно-сухой массы, урожайности семян, высоте растений и облиственности образцов. Изучали продолжительность периода вегетации и межфазных периодов.

При изучении продолжительности периода вегетации и межфазных периодов фенофазу «полные всходы» отмечали, когда на делянке взошло более 75% растений; фенофазу «отрастание» – при развертывании и увеличении размеров листьев; фенофазу «начало цветения» – при раскрытии цветков у 10–20% растений; фенофазу «созревание семян» – при побурении 60–80% бобов.

Урожайность зеленой массы учитывали в первый год жизни растений после прекращения роста, во второй год жизни – в начале цветения растений.

Урожайность воздушно-сухой массы определяли по пробному снопу зеленой массы (весом 500 г), который высушивали на открытом воздухе под навесом до постоянной массы.

Высоту растений в первый год жизни измеряли после прекращения роста, во второй год жизни – в начале цветения растений.

Для вычисления облиственности растений использовали пробный сноп, взятый для определения воздушно-сухой массы. Облиственность растений рассчитывали, как процент массы листьев от общей массы пробного снопа.

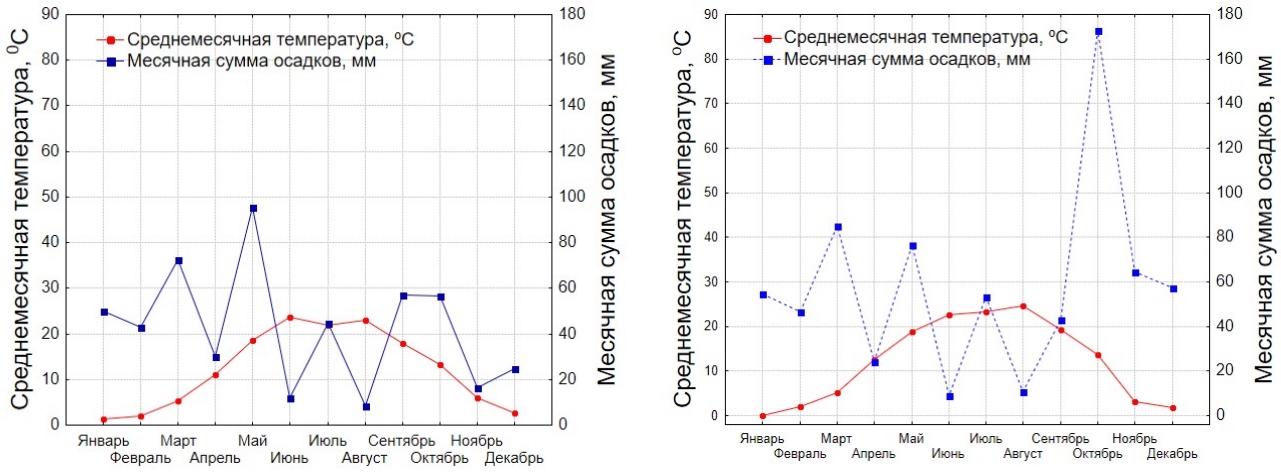
Урожайность семян учитывали после обмолота, высушивания и очистки.

Статистическая обработка результатов исследований выполнена методами базовой статистики, дисперсионного, корреляционного и факторного анализов в пакете программ Statistica 13.3 (Novikova, 2024). При анализе корреляционных связей считали очень сильными связи при значении r от 0,90 до 1, сильными – от 0,70 до 0,89, средними – от 0,50 до 0,69, умеренными – от 0,30 до 0,49, слабыми – от 0,10 до 0,29 (https://sky.pro/wiki/analytics/koeffitsient-korrelyatsii-polnaya-tablitsa-znachenij-i-ih-interpretatsiya).

Погодные условия эксперимента

Кубанская опытная станция ВИР расположена в степной зоне Прикубанской равнины. Зона характеризуется обилием тепла, недостатком увлажнения и неустойчивостью всех метеорологических факторов (Gavrilov, 1961).

Метеорологические данные получены из метеопункта Кубанской опытной станции. Весна 2018 г. отличалась достаточным количеством осадков, что положительно отразилось на формировании корневой системы растений донника. Лето было засушливым. Недостаток влаги неблагоприятно сказался на развитии вегетативной массы растений. Осень отличалась неравномерным выпадением осадков и высокой температурой воздуха. Зима 2018/2019 г. была теплой, влажной и бесснежной. Погода была комфортной для перезимовки донника, выпадов растений не наблюдалось. Весна 2019 г. наступила рано и характеризовалась хорошей влагообеспеченностью. Во время цветения образцов наблюдались частые дожди, что привело к уменьшению лёта опылителей и вызвало снижение семенной продуктивности образцов. Лето было жарким и сухим. Высокая температура, низкая относительная влажность воздуха и недостаток осадков способствовали быстрому расходу запасов влаги из почвы. На рисунке представлено графическое изображение погодных условий за годы изучения при помощи климатограмм.



a) b)

Рисунок. Климатограммы: a) 2018 г.; b) 2019 г.

Figure. Climographs: a) for 2018; b) for 2019

Результаты и их обсуждение

Продолжительность вегетационного периода и продолжительность отдельных фенологических фаз – важнейшие характеристики экологической приспособленности образцов.

Посев был произведен в оптимальный срок, 25 апреля. У всех образцов донника белого и большинства образцов донника желтого фенофаза «полные всходы» наступила 13 мая. Период прорастания семян «посев – полные всходы» длился 18 дней. У трех дикорастущих образцов: донника желтого из Саратовской области (к-10227), зубчатого из Украины (к-30502) и волжского из Чехословакии (к-40965) фенофаза «полные всходы» наступила на два дня позже. Период прорастания семян «посев – полные всходы» длился 20 дней. Лето было засушливым, недостаток влаги сказался на развитии вегетативной массы растений. В первый год жизни у изучаемых образцов цветение не наступило. Осень отличалась теплой погодой и неравномерным распределением осадков. Прекращение вегетации у всех образцов отметили 20 октября и провели подкашивание образцов перед уходом в зиму. Вегетационный период составил 160 дней (158 дней у трех образцов, всходы которых появились на 2 дня позже).

Во второй год жизни растений фенофаза «отрастание» у всех образцов наблюдалась 3 марта. У большинства образцов фенофаза «начало цветения» наступила 30 мая, межфазный период «отрастание – начало цветения» составил 88 дней. У дикорастущих образцов: донника желтого из США (к-38632) и донника белого из Читинской области (к-43580) фенофаза «начало цветения» наступила 27 мая и межфазный период «отрастание – начало цве-

тения» составил 85 дней. У образцов донника белого: дикорастущих из Канады (к-1006), Таджикистана (к-31403) и Австралии (к-48542), а также сорта 'Bokros' из Венгрии (к-30495) начало цветения наступило 10 июня и межфазный период «отрастание – начало цветения» составил 99 дней. Межфазный период «отрастание – начало цветения» у всех образцов в соответствии с классификатором был длинным – от 85 до 99 дней. У большинства образцов фенофазу «созревание семян» наблюдали 4 июля. Межфазный период «отрастание – созревание семян» составил 123 дня. По продолжительности вегетационного периода большинство изучаемых образцов по классификатору отнесены к среднеспелым. У образцов донника белого: дикорастущих из Канады (к-1006), Таджикистана (к-31403), Израиля (к-43714) и Австралии (к-48542), а также сорта 'Bokros' из Венгрии (к-30495) фенофаза «созревание семян» наступила позже, 15 июля. Межфазный период «отрастание – созревание семян» был длинным и составил 134 дня. По продолжительности вегетационного периода эти образцы в соответствии с классификатором отнесены к позднеспелым.

Урожайность зеленой массы. Донник является ценным высокобелковым кормом для сельскохозяйственных животных, поэтому важнейшими характеристиками культуры являются урожайность зеленой и воздушно-сухой массы (Suvorov, 1950, 1962).

Диапазон варьирования признака для всех образцов составил от 0,24 ± 0,08 кг/м^2 до 3,55 ± 1,48 кг/м^2. По урожайности зеленой массы в среднем за два года изучения лучший результат показал дикорастущий образец донника волжского из Венгрии (к-40146), который превзошел стандарт на 55,0%. Превысили стандарт по этому признаку дикорастущие образцы донника белого из Израиля (к-43714) – на 24,5% и Таджикистана (к-31403) – на 17,9 (табл. 2).

Урожайность воздушно-сухой массы. Сено является важной составляющей рациона животных, особенно для районов, где климатические условия не позволяют круглогодично использовать зеленый корм. Сено донника лучше поедается животными, чем зеленый корм, так как при сушке значительно снижается содержание кумарина, придающего корму горький вкус (Suvorov, 1950, 1962).

Диапазон варьирования признака для всех образцов составил от 0,07 ± 0,03 кг/м^2 до 0,85 ± 0,30 кг/м^2. Лучшие показатели по этому признаку в среднем за два года изучения были у дикорастущих образцов донника волжского из Венгрии (к-40146), который превзошел стандарт на 23,2%, и донника белого из Канады (к-1006), превысившего стандарт на 20,3%. (табл. 3).

Высота растений – важный признак для оценки образцов, так как выявлена положительная корреляция урожайности зеленой и воздушно-сухой массы с высотой растений (Suvorov, 1950, 1962).

Диапазон варьирования признака для всех образцов составил от 87,50 ± 20,97 см до 126,25 ± 16,75 см. По высоте растений в среднем за два года изучения превысили стандарт на 4,4–8,7% дикорастущие образцы донника белого из Канады (к-1006) и Таджикистана (к-31403), сорта 'Bokros' из Венгрии (к-30495) и 'Приморский 74' из Приморского края (к-44075), а также дикорастущие образцы донника волжского из Венгрии (к-40146) и желтого из Казахстана (к-38048). Результаты представлены в таблице 4.

Облиственность растений в значительной степени определяет качество корма, так как в листьях содержится больше питательных веществ, чем в других частях растения (Suvorov, 1950, 1962).

Диапазон варьирования признака для всех образцов составил от 33,75 ± 6,26% до 48,00 ± 4,64%. По облиственности растений в среднем за два года изучения дикорастущий образец донника желтого из Саратовской области (к-10277) превысил стандарт на 24,4%. На уровне стандарта была облиственность у дикорастущих образцов донника желтого из Узбекистана (к-50134), донника белого из Австралии (к-48542), Израиля (к-43714) и Воронежской области (к-2205). Дикорастущие образцы донника крымского из Крыма (к-9372) и донника зубчатого из Курганской области (к-31520) также не уступали стандарту по этому признаку (табл. 5).

Семенная продуктивность во второй год жизни растений составляла от 4,9 ± 2,6 г/м^2 до (99,5 ± 13,2 г/м^2. Все изучаемые образцы по данному признаку уступали стандарту, урожайность семян которого была 112,5 ± 15,3 г/м^2. Лучшим по этому показателю оказался сорт донника желтого 'Малокумаринный' из США (к-36675), семенная продуктивность которого составила 88,4% к стандарту.

Низкая семенная продуктивность была вызвана неравномерностью созревания и осыпаемостью семян изучаемых образцов.

Закономерности изменчивости и структуры связей признаков

В результате корреляционного анализа выявлена очень сильная связь урожайности зеленой массы с воздушно-сухой (r = 0,97), сильная связь семенной продуктивности с массой 1000 семян (r = 0,89). Наблюдалась средняя связь зеленой (r = 0,65) и воздушно-сухой (r = 0,68) массы с высотой растений. Наличие значимых корреляционных связей между признаками вегетативного развития растений и семенной продуктивностью позволяет целенаправленно проводить селекцию донника на высокую урожайность семян, сена и зеленой массы.

Для выявления закономерностей изменчивости и структуры связей изучаемых признаков использовали факторный анализ, который выявил 3 фактора, описывающих в первый год жизненного цикла растений 95,8%, а во второй – 88,7% общей дисперсии признаков.

В первый год жизненного цикла растений с фактором 1 (D^2 = 37,2%) коррелировали урожайность зеленой и воздушно-сухой массы (факторная нагрузка r = 0,986 и r = 0,969 соответственно). С фактором 2 (D^2 = 33,5 %) была связана продолжительность периода прорастания семян «посев – всходы» (факторная нагрузка r = –0,993). С фактором 3 (D^2 = 25,1 %) коррелировали высота и облиственность растений, находящиеся в обратной связи (факторная нагрузка r = –0,931 и r = 0,798 соответственно).

Во второй год жизненного цикла растений с фактором 1 (D^2 = 41,4 %) были связаны урожайность зеленой и воздушно-сухой массы, а также высота растений. С фактором 2 (D^2 = 31,6 %) коррелировали продолжительность межфазных периодов «начало отрастания – начало цветения» и «начало отрастания – созревание семян» (факторная нагрузка r = 0,951 и r = 0,960 соответственно). С фактором 3 (D^2 = 15,7 %) была связана облиственность растений (факторная нагрузка r = –0,925).

Таблица 2. Урожайность зеленой массы образцов донника (*Melilotus* Mill.) за два года изучения (Краснодарский край, 2018, 2019 г.)
Table 2. Green biomass yield of sweet clover (*Melilotus* Mill.) accessions over two years of study (Krasnodar Territory, 2018 and 2019)

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Название Name	Происхождение / Origin	Урожайность зелёной массы (кг/м²) / Green biomass yield (kg/m²)						
			1-й год жизни растений / 1st year of plant life		2-й год жизни растений / 2nd year of plant life		В среднем за 2 года изучения / Average for 2 years of study		
			mean	± SE	mean	± SE	mean	± SE	% к st. / % to st.
Донник белый (*M. albus* Medik.)									
1006	Дикорастущий	Канада	0,63	0,13	4,18	0,93	2,40	1,09	104,80
2205	Дикорастущий	Воронежская обл.	0,56	0,04	1,55	0,05	1,06	0,29	46,29
30495	‘Bokros’	Венгрия	0,53	0,13	3,10	0,00	1,81	0,75	79,04
31403	Дикорастущий	Таджикистан	0,85	0,00	4,56	0,45	2,70	1,08	117,90
38872	‘Шедевр 75’	Казахстан	0,65	0,00	1,14	0,41	0,90	0,22	39,30
43580	Дикорастущий	Читинская обл.	0,60	0,00	1,53	0,03	1,06	0,27	46,29
43714	Дикорастущий	Израиль	0,85	0,00	4,85	0,05	2,85	1,15	124,45
44075	‘Приморский 74’	Приморский кр.	0,68	0,08	3,75	0,25	2,21	0,89	96,51
48542	Дикорастущий	Австралия	0,55	0,25	1,73	0,43	1,14	0,39	49,78
Донник желтый (*M. officinalis* (L.) Pall.)									
10277	Дикорастущий	Саратовская обл.	0,55	0,10	4,35	0,15	2,45	1,10	106,99
13397	Дикорастущий	Украина	0,38	0,13	1,23	0,48	0,80	0,32	34,93
36675	‘Малокумаринный’	США	0,51	0,16	3,65	0,05	2,08	0,91	90,83
36680	‘Малокумаринный’	США	0,65	0,05	4,10	0,10	2,38	1,00	103,93
38048	Дикорастущий	Казахстан	0,35	0,05	3,48	0,23	1,91	0,91	83,41
38632	Дикорастущий	США	0,60	0,10	2,98	1,28	1,79	0,86	78,17
39369	Дикорастущий	Азербайджан	0,33	0,08	2,64	0,56	1,49	0,71	65,07
50134	Дикорастущий	Узбекистан	0,29	0,07	1,55	0,10	0,92	0,37	40,18

Таблица 2. Окончание
Table 2. The end

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Название Name	Происхождение / Origin	Урожайность зелёной массы (кг/м²) / Green biomass yield (kg/m²)						
			1-й год жизни растений / 1st year of plant life		2-й год жизни растений / 2nd year of plant life		В среднем за 2 года изучения / Average for 2 years of study		
			mean	± SE	mean	± SE	mean	± SE	% к st. / % to st.
52290	‘Ишимский Ранний’	Казахстан	0,50	0,10	4,18	0,33	2,34	1,07	102,18
53263	‘Донче’, st.	Ставропольский кр.	0,77	0,03	3,81	0,59	2,29	0,43	100,00
Донник зубчатый (*M. dentatus* (Waldst. et Kit.) Desf.)									
30502	Дикорастущий	Украина	0,23	0,18	0,93	0,23	0,58	0,23	25,33
31135	Дикорастущий	Челябинская обл.	0,13	0,03	0,93	0,27	0,53	0,26	23,14
31520	Дикорастущий	Курганская обл.	0,53	0,13	3,50	0,40	2,02	0,87	88,21
Донник волжский (*M. wolgicus* Poir.)									
40146	Дикорастущий	Венгрия	1,00	0,20	6,10	0,15	3,55	1,48	155,02
40965	Дикорастущий	Чехословакия	0,16	0,14	0,33	0,03	0,24	0,08	10,48
50831	Дикорастущий	Германия	0,90	0,15	3,10	0,20	2,00	0,64	87,33
Донник крымский (*M. tauricus* (M. Bieb.) Ser.)									
9372	Дикорастущий	Крым	0,39	0,36	3,43	0,03	1,91	0,89	83,41

Примечание: mean – среднее значение; SE – стандартная ошибка среднего; st. – стандарт
Note: mean – mean value; SE – standard error of the mean; st. – standardized reference cultivar

Таблица 3. Урожайность воздушно-сухой массы образцов донника (*Melilotus* Mill.) за два года изучения (Краснодарский край, 2018, 2019 г.)
Table 3. Air-dry biomass yield of sweet clover (*Melilotus* Mill.) accessions over two years of study (Krasnodar Territory, 2018 and 2019)

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Название / Name	Происхождение / Origin	Урожайность воздушно-сухой массы (кг/м²) / Air-dry biomass yield (kg/m²)						
			1-й год жизни растений / 1st year of plant life		2-й год жизни растений / 2nd year of plant life		В среднем за 2 года изучения / Average for 2 years of study		
			mean	± SE	mean	± SE	mean	± SE	% к st. / % to st.
Донник белый (*M. albus* Medik.)									
1006	Дикорастущий	Канада	0,22	0,05	1,44	0,37	0,83	0,38	120,29
2205	Дикорастущий	Воронежская обл.	0,19	0,01	0,37	0,02	0,28	0,05	40,58
30495	'Bokros'	Венгрия	0,20	0,02	0,71	0,04	0,45	0,15	65,22
31403	Дикорастущий	Таджикистан	0,31	0,00	0,94	0,09	0,63	0,19	91,30
38872	'Шедевр 75'	Казахстан	0,26	0,01	0,26	0,12	0,26	0,05	37,68
43580	Дикорастущий	Читинская область	0,21	0,02	0,36	0,03	0,28	0,05	40,58
43714	Дикорастущий	Израиль	0,31	0,02	1,09	0,06	0,70	0,23	101,45
44075	'Приморский 74'	Приморский кр.	0,19	0,09	0,94	0,09	0,56	0,22	81,16
48542	Дикорастущий	Австралия	0,21	0,09	0,34	0,03	0,27	0,05	39,13
Донник желтый (*M. officinalis* (L.) Pall.)									
10277	Дикорастущий	Саратовская обл.	0,20	0,06	0,89	0,08	0,55	0,20	79,71
13397	Дикорастущий	Украина	0,15	0,05	0,27	0,11	0,21	_0,06	30,43
36675	'Малокумаринный'	США	0,15	0,05	1,00	0,00	0,58	0,25	84,06
36680	'Малокумаринный'	США	0,28	0,01	1,17	0,05	0,73	0,26	105,80
38048	Дикорастущий	Казахстан	0,12	0,02	0,90	0,13	0,51	0,23	73,91
38632	Дикорастущий	США	0,20	0,04	0,76	0,40	0,48	0,23	69,57
39369	Дикорастущий	Азербайджан	0,11	0,06	0,57	0,16	0,34	0,15	49,28
50134	Дикорастущий	Узбекистан	0,11	0,02	0,30	0,01	0,20	0,06	28,99

Таблица 3. Окончание
Table 3. The end

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Название / Name	Происхождение / Origin	Урожайность воздушно-сухой массы (кг/м²) / Air-dry biomass yield (kg/m²)						
			1-й год жизни растений / 1st year of plant life		2-й год жизни растений / 2nd year of plant life		В среднем за 2 года изучения / Average for 2 years of study		
			mean	± SE	mean	± SE	mean	± SE	% к st. / % to st.
52290	‘Ишимский Ранний’	Казахстан	0,17	0,03	1,13	0,17	0,65	0,29	94,20
53263	‘Донче’, st.	Ставропольский кр.	0,30	0,01	1,08	0,18	0,69	0,12	100,00
Донник зубчатый (*M. dentatus* (Waldst. et Kit.) Desf.)									
30502	Дикорастущий	Украина	0,08	0,07	0,18	0,05	0,13	0,05	18,84
31135	Дикорастущий	Челябинская обл.	0,08	0,02	0,26	0,01	0,17	0,05	24,64
31520	Дикорастущий	Курганская обл.	0,18	0,08	0,85	0,14	0,51	0,21	73,91
Донник волжский (*M. wolgicus* Poir.)									
40146	Дикорастущий	Венгрия	0,34	0,07	1,37	0,07	0,85	0,30	123,19
40965	Дикорастущий	Чехословакия	0,08	0,07	0,06	0,01	0,07	0,03	10,14
50831	Дикорастущий	Германия	0,33	0,03	0,77	0,02	0,55	0,13	79,71
Донник крымский (*M. tauricus* (M. Bieb.) Ser.)									
9372	Дикорастущий	Крым	0,16	0,15	0,82	0,01	0,49	0,20	71,01

Примечание: mean – среднее значение; SE – стандартная ошибка среднего; st. – стандарт

Note: mean – mean value; SE – standard error of the mean; st. – standardized reference cultivar

Таблица 4. Высота растений образцов донника (*Melilotus* Mill.) за два года изучения (Краснодарский край, 2018, 2019 г.)
Table 4. Plant height of sweet clover (*Melilotus* Mill.) accessions over two years of study (Krasnodar Territory, 2018 and 2019)

№ по каталогу / VIR catalogue No.	Название / Name	Происхождение / Origin	Высота растений (см) / Plant height (cm)						
			1-й год жизни растений / 1st year of plant life		2-й год жизни растений / 2nd year of plant life		В среднем за 2 года изучения / Average for 2 years of study		
			mean	± SE	mean	± SE	mean	± SE	% к st / % to st
Донник белый (*M. albus* Medik.)									
1006	Дикорастущий	Канада	97,50	2,50	155,00	5,00	126,25	16,75	108,71
2205	Дикорастущий	Воронежская обл.	72,50	2,50	137,50	7,50	105,00	19,04	90,42
30495	'Bokros'	Венгрия	95,00	0,00	155,00	0,00	125,00	17,32	107,64
31403	Дикорастущий	Таджикистан	92,50	2,50	152,50	2,50	122,50	17,38	105,49
38872	'Шедевр 75'	Казахстан	72,50	2,50	130,00	20,00	101,25	18,53	87,19
43580	Дикорастущий	Читинская область	80,00	10,00	140,00	10,00	110,00	18,26	94,72
43714	Дикорастущий	Израиль	87,50	2,50	152,50	7,50	120,00	19,04	103,33
44075	'Приморский 74'	Приморский кр.	92,50	2,50	150,00	5,00	121,25	16,76	104,41
48542	Дикорастущий	Австралия	72,50	7,50	135,00	5,00	103,75	18,41	89,34
Донник желтый (*M. officinalis* (L.) Pall.)									
10277	Дикорастущий	Саратовская обл.	67,50	2,50	150,00	10,00	108,75	24,19	93,65
13397	Дикорастущий	Украина	100,00	0,00	132,50	17,50	116,25	11,79	100,10
36675	'Малокумаринный'	США	87,50	7,50	152,50	2,50	120,00	19,04	103,33
36680	'Малокумаринный'	США	80,00	10,00	157,50	7,50	118,75	22,95	102,26
38048	Дикорастущий	Казахстан	85,00	5,00	157,50	7,50	121,25	21,25	104,41
38632	Дикорастущий	США	75,00	5,00	147,50	2,50	111,25	21,05	95,80
39369	Дикорастущий	Азербайджан	85,00	5,00	132,50	12,50	108,75	14,77	93,65
50134	Дикорастущий	Узбекистан	75,00	5,00	125,00	10,00	100,00	15,14	86,11

Таблица 4. Окончание
Table 4. The end

№ по каталогу / VIR catalogue No.	Название / Name	Происхождение / Origin	Высота растений (см) / Plant height (cm)						
			1-й год жизни растений / 1st year of plant life		2-й год жизни растений / 2nd year of plant life		В среднем за 2 года изучения / Average for 2 years of study		
			mean	± SE	mean	± SE	mean	± SE	% к st / % to st
52290	‘Ишимский Ранний’	Казахстан	85,00	5,00	150,00	0,00	117,50	18,87	101,18
53263	‘Донче’, st.	Ставропольский кр.	80,83	3,47	151,42	7,51	116,13	8,40	100,00
Донник зубчатый (*M. dentatus* (Waldst. et Kit Desf.)									
30502	Дикорастущий	Украина	72,50	17,50	105,50	10,50	89,00	12,66	76,64
31135	Дикорастущий	Челябинская обл.	65,00	5,00	110,00	40,00	87,50	20,97	75,35
31520	Дикорастущий	Курганская обл.	70,00	0,00	150,00	0,00	110,00	23,09	94,72
Донник волжский (*M. wolgicus* Poir.)									
40146	Дикорастущий	Венгрия	92,50	2,50	150,00	10,00	121,25	17,12	104,41
40965	Дикорастущий	Чехословакия	100,00	20,00	120,00	10,00	110,00	10,80	94,72
50831	Дикорастущий	Германия	82,50	7,50	147,50	7,50	115,00	19,26	99,03
Донник крымский (*M. tauricus* (M. Bieb.)Ser.)									
9372	Дикорастущий	Крым	62,50	7,50	115,00	25,00	88,75	18,53	76,42

Примечание: mean – среднее значение; SE – стандартная ошибка среднего; st. – стандарт
Note: mean – mean value; SE – standard error of the mean; st. – standardized reference cultivar

Таблица 5. Облиственность растений образцов донника (*Melilotus* Mill.) за два года изучения (Краснодарский край, 2018, 2019 г.)

Table 5. Leafiness of sweet clover (*Melilotus* Mill.) accessions over two years of study (Krasnodar Territory, 2018 and 2019)

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Название / Name	Происхождение / Origin	Облиственность растений (%) / Plant leafiness (%)						
			1-й год жизни растений / 1st year of plant life		2-й год жизни растений / 2nd year of plant life		В среднем за 2 года изучения / Average for 2 years of study		
			mean	± SE	mean	± SE	mean	± SE	% к st. / % to st.
Донник белый (*M. albus* Medik.)									
1006	Дикорастущий	Канада	44,00	3,00	28,50	1,50	36,25	4,68	93,96
2205	Дикорастущий	Воронежская обл.	50,00	0,00	29,00	4,00	39,50	6,28	102,38
30495	‘Bokros’	Венгрия	45,00	2,00	30,00	3,00	37,50	4,57	97,20
31403	Дикорастущий	Таджикистан	42,00	2,00	30,00	0,00	36,00	3,56	93,31
38872	‘Шедевр 75’	Казахстан	46,50	0,50	24,50	0,50	35,50	6,36	92,02
43580	Дикорастущий	Читинская область	44,50	0,50	26,00	1,00	35,25	5,36	91,37
43714	Дикорастущий	Израиль	50,00	1,00	31,50	1,50	40,75	5,39	105,62
44075	‘Приморский 74’	Приморский кр.	48,00	2,00	25,00	0,00	36,50	6,69	94,61
48542	Дикорастущий	Австралия	53,00	3,00	31,50	6,50	42,25	6,86	109,51
Донник желтый (*M. officinalis* (L.) Pall.)									
10277	Дикорастущий	Саратовская обл.	56,00	1,00	40,00	0,00	48,00	4,64	124,42
13397	Дикорастущий	Украина	40,50	2,50	30,50	5,50	35,50	3,80	92,02
36675	‘Малокумаринный’	США	45,00	1,00	29,00	0,00	37,00	4,64	95,90
36680	‘Малокумаринный’	США	46,00	1,00	25,50	3,50	35,75	6,10	92,66
38048	Дикорастущий	Казахстан	44,50	0,50	23,00	2,00	33,75	6,26	87,48
38632	Дикорастущий	США	46,50	0,50	31,50	4,50	39,00	4,71	101,09
39369	Дикорастущий	Азербайджан	42,00	1,00	28,00	8,00	35,00	5,21	90,72
50134	Дикорастущий	Узбекистан	46,00	0,00	36,50	3,50	41,25	3,09	106,92

Таблица 5. Окончание
Table 5. The end

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Название / Name	Происхождение / Origin	Облиственность растений (%) / Plant leafiness (%)						
			1-й год жизни растений / 1st year of plant life		2-й год жизни растений / 2nd year of plant life		В среднем за 2 года изучения / Average for 2 years of study		
			mean	± SE	mean	± SE	mean	± SE	% к st. / % to st.
52290	‘Ишимский Ранний’	Казахстан	46,50	2,50	27,00	4,00	36,75	5,95	95,26
53263	‘Донче’, st.	Ставропольский кр.	49,33	0,77	27,83	1,35	38,58	2,37	100,00
Донник зубчатый (*M. dentatus* (Waldst. et Kit.) Desf.)									
30502	Дикорастущий	Украина	42,50	0,50	30,00	0,00	36,25	3,61	93,96
31135	Дикорастущий	Челябинская обл.	42,50	1,50	31,50	4,50	37,00	3,72	95,90
31520	Дикорастущий	Курганская обл.	51,50	3,50	28,00	3,00	39,75	7,04	103,03
Донник волжский (*M. wolgicus* Poir.)									
40146	Дикорастущий	Венгрия	48,00	1,00	28,50	1,50	38,25	5,68	99,14
40965	Дикорастущий	Чехословакия	33,50	4,50	35,50	7,50	34,50	3,62	89,42
50831	Дикорастущий	Германия	47,00	3,00	26,50	3,50	36,75	6,21	95,26
Донник крымский (*M. tauricus* (M. Bieb.) Ser.)									
9372	Дикорастущий	Крым	48,50	9,50	32,50	0,50	40,50	6,03	104,98

Примечание: mean – среднее значение; SE – стандартная ошибка среднего; st. – стандарт
Note: mean – mean value; SE – standard error of the mean; st. – standardized reference cultivar

По результатам факторного анализа выделены группы сопряженных признаков. В первый и второй годы жизненного цикла растений фактор 1 описывает мощность развития растений, фактор 2 – структуру вегетационного периода, а фактор 3 – облиственность растений. Факторный анализ результатов изучения образцов донника выявил ключевые факторы, определяющие свойства образцов. Выводы, полученные из факторного анализа, имеют практическое значение. Они позволяют понять биологические особенности донника и оптимизировать селекционные программы. Результаты факторного анализа представлены в таблице 6.

Таблица 6. Изменчивость факторной структуры селекционно ценных признаков образцов донника (*Melilotus* Mill.) в разные годы жизненного цикла (Краснодарский край, 2018, 2019 г.)

Table 6. Factor structure variability for the traits of breeding value in sweet clover (*Melilotus* Mill.) accessions in different years of the life cycle (Krasnodar Territory, 2018 and 2019)

Переменные / Variables	Факторные координаты переменных на основе корреляций / Factor coordinates of variables based on correlations		
	Фактор 1 / Factor 1	Фактор 2 / Factor 2	Фактор 3 / Factor 3
Первый год жизненного цикла растений			
Высота растений	0,238	0,0168	–0,931
Урожайность зеленой массы	0,986	0,116	–0,002
Урожайность воздушно-сухой массы	0,969	0,120	0,009
Облиственность растений	0,495	–0,098	0,798
Продолжительность периода «посев – всходы»	–0,101	**–0,993**	0,045
Доля общей дисперсии (D^2)	37,2	33,5	25,1
Второй год жизненного цикла растений			
Высота растений	0,851	0,168	0,253
Урожайность зелёной массы	0,928	0,138	0,022
Урожайность воздушно-сухой массы	0,951	0,095	0,098
Облиственность растений	–0,217	0,125	–0,925
Урожайность семян	0,538	–0,559	–0,389
Продолжительность периода «начало отрастания – начало цветения»	0,193	0,951	–0,098
Продолжительность периода «начало отрастания – созревание» семян»	0,182	0,960	–0,076
Доля общей дисперсии (D^2)	41,4	31,6	15,7

В результате статистической обработки (дисперсионного анализа) опытных данных рассчитаны достоверные доли влияния генотипа, года и их взаимодействия (генотип × год) на изменчивость селекционно ценных признаков.

Урожайность зеленой массы

Значение критерия Фишера (F) для генотипа – F = 3,77 при p = 0,05, для года – F = 203,83 при p = 0,05, для взаимодействия генотипа и года – F = 2,39 при p = 0,05. Наибольшая доля влияния на изменчивость признака была у года (η^2 = 47,4 %), наименьшая (η^2 = 13,9 %) – у взаимодействия генотипа и года. Доля влияния генотипа на изменчивость признака составила η^2 = 21,9 %, неучтенных факторов – η^2 = 16,8%.

Урожайность воздушно-сухой массы

Обнаружено влияние на изменчивость признака генотипа (F = 3,18 при p = 0,05), года (F = 103,25 при p = 0,05), взаимодействия года и генотипа (F = 1,84 при p = 0,05). Доля влияния года на изменчивость признака была наименьшей по сравнению с другими признаками и составила η^2 = 34,3%. Доля влияния генотипа составила η^2 = 26,4 % и была наибольшей по сравнению с другими признаками. Наименьшая доля влияния на изменчивость признака была у взаимодействия генотипа и года, составив η^2 = 15,3 %. Доля влияния неучтенных факторов составила η^2 = 24,0 %.

Высота растений

Обнаружено влияние на изменчивость признака генотипа (F = 1,83 при p = 0,05) и года (F = 339,06 при p = 0,05). Доля влияния года была наибольшей по сравнению с другими признаками и составила η^2 = 70,9%. Доля влияния генотипа на изменчивость признака составила η^2 = 9,6%, неучтенных факторов – η^2 = 15,0%. Доля влияния взаимодействия генотипа и года (η^2 = 4,5%) не была значимой.

Облиственность растений

Выявлено влияние на изменчивость признака генотипа (F = 1,98 при p = 0,05) и года (F = 393,90 при p = 0,05), а также их совместное влияние (F = 1,89 при p = 0,05). Доля влияния года (η^2 = 70 %) на изменчивость признака

была высокой, взаимодействия генотипа и года (η^2 = 8,4%) – низкой. Доли влияния генотипа (η^2 = 8,8%) и неучтенных факторов (η^2 = 12,8 %) были наименьшими по сравнению с другими изученными нами признаками.

В результате исследования определено, что на изменчивость признаков наибольшее влияние оказывает год изучения (от η^2 = 34,3% до η^2 = 70,9%), а наименьшее (от η^2 = 4,5% до η^2 = 15,3%) – взаимодействие генотипа и года. Доля влияния генотипа на признаки варьировала от η^2 = 8,8 % до η^2 = 26,4%, доля влияния неучтенных факторов колебалась от η^2 = 12,8% до η^2 = 24,0%. Вариабельность признаков в большей степени вызвана годом жизненного цикла растений, поскольку у двулетней культуры в первый год формируются органы вегетативной сферы растений, а во второй происходит формирование органов генеративной сферы.

Заключение

Вариабельность признаков у изученных в условиях Северного Кавказа образцов в значительной степени определялась годом жизненного цикла растений, в меньшей – генотипом и взаимодействием генотипа и года.

Корреляционный анализ селекционно ценных признаков выявил очень сильную связь урожайности зеленой массы с воздушно-сухой (r = 0,97), сильную – между семенной продуктивностью и массой 1000 семян (r = 0,89), среднюю – между зеленой (r = 0,65) и воздушно-сухой (r = 0,68) массой и высотой растений. Выявленные взаимосвязи позволяют понять биологические особенности донника в условиях Кубанской опытной станции ВИР и оптимизировать селекцию культуры в регионе исследования.

Для использования в селекционных программах с целью создания высокопродуктивных сортов донника, адаптированных к условиям Северного Кавказа, наибольшую ценность представляют образцы – источники хозяйственно ценных признаков. К ним относятся дикорастущие образцы с высокими показателями урожайности зеленой массы – донника волжского из Венгрии (к-40146), донника белого из Израиля (к-43714) и Таджикистана (к-31403); урожайности воздушно-сухой массы – дикорастущий образец донника волжского из Венгрии (к-40146) и образец донника белого из Канады (к-1006); высоты растений – дикорастущий образец донника белого из Канады (к-1006) и сорт ‘Bokros’ из Венгрии (к-30495); облиственности растений – дикорастущий образец донника желтого из Саратовской области (к-10277).

References / Литература

Bobrov E.G. Genus 791. Sweet clover – *Melilotus* Adans. In: *Flora of the USSR. Vol. 11*. Moscow; Leningrad: USSR Academy of Sciences; 1945. p.176-189. [in Russian] (Бобров Е.Г. Род 791. Донник – *Melilotus* Adans. В кн.: *Флора СССР. Т. 11*. Москва; Ленинград: АН СССР; 1945. С.176-189).

Gavrilov V.P. (ed.) Agroclimatic reference book for Krasnodar Territory (Agroklimaticheskiy spravochnik po Krasnodarskomu krayu). Krasnodar: Krasnodar Book Publishers; 1961. [in Russian] (Агроклиматический справочник по Краснодарскому краю / под ред. В.П. Гаврилова. Краснодар: Краснодарское книжное издательство; 1961).

Ivanov A.I., Bukhteeva A.V., Shutova Z.P., Tikhomirova I.A., Soskov Yu.D., Sinyakov A.A., Bazylev E.Ya. Study of the collection of perennial forage plants. Guidelines (Izucheniye kollektsii mnogoletnikh kormovykh rasteniy. Metodicheskiye ukazaniya). Leningrad: VIR; 1985. [in Russian] (Иванов А.И., Бухтеева А.В., Шутова З.П., Тихомирова И.А., Сосков Ю.Д., Синяков А.А., Базылев Э.Я. Изучение коллекции многолетних кормовых растений. Методические указания. Ленинград: ВИР; 1985).

Ivanov A.I., Sagalbekov U.M., Chetvertnykh L.M., Hannibal O.V. Catalogue of the VIR global collection. Issue 376. Sweet clover – *Melilotus* Mill. Leningrad: VIR; 1984. [in Russian] (Иванов А.И., Сагалбеков У.М., Четвертных Л.М., Ганнибал О.В. Каталог мировой коллекции ВИР. *Melilotus* Mill. Выпуск 376. Ленинград: ВИР; 1984).

Ivanov A.I., Sagalbekov U.M., Korneychuk V.A., Krivchik O.V. List of descriptors for the genus *Melilotus* Mill. (Klassifikator roda *Melilotus* Mill.). Leningrad: VIR; 1988. [in Russian] (Иванов А.И., Сагалбеков У.М., Корнейчук В.А., Кривчик О.В. Классификатор рода *Melilotus* Mill. Ленинград: ВИР; 1988).

Mukhambetov B. Reclamation crop rotations with sweet clover and pipeline fodder production on saline lands of the Caspian region (Donnikovye meliorativnye sevooboroty i konveyernoye proizvodstvo kormov na zasolennykh zemlyakh Prikaspiya). *Scientific Agronomy Journal*. 2009;1(84):32-36. [in Russian] (Мухамбетов Б. Донниковые мелиоративные севообороты и конвейерное производство кормов на засоленных землях Прикаспия. *Научно-агрономический журнал*. 2009;1(84):32-36).

Novikova L.Yu. Methods for statistical processing of phenotypic data in plant genetic resources collections. St. Petersburg: VIR; 2024. [in Russian] (Новикова Л.Ю. Методы статистической обработки фенотипических данных коллекций генетических ресурсов растений. Санкт-Петербург: ВИР; 2024).

Parsaev E.I., Filippova N.I., Kobernickaya T.M., Ostrovsky V.A. New variety of Karlybas volzhski melilot for fodder production in Northern Kazakhstan. *Multifunctional Adaptive Fodder Production*. 2020;23(71):73-77. [in Russian] (Парсаев Е.И., Филиппова Н.И., Коберницкая Т.М., Островский В.А. Новый сорт донника волжского Карлыбас для кормопроизводства Северного Казахстана. *Многофункциональное адаптивное кормопроизводство*. 2020;23(71):73-77). DOI: 10.33814/MAK-2020-23-71-73-77

Riksen V.S., Korobova L.N., Lomova T.G. The influence of crop rotation with sweet clover on the biological and physicochemical properties of the subsalonetz horizon of fine solonetz. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2024;38(1):4-9. [in Russian] (Риксен В.С., Коробова Л.Н., Ломова Т.Г. Влияние севооборота с донником на биологические и физико-химические свойства подсолонцового горизонта солонца мелкого. *Достижения науки и техники АПК*. 2024;38(1):4-9). DOI: 10.53859/02352451_2024_38_1_4

SkyPro. Correlation coefficient: a complete table of values and their interpretation (Koeffitsiyent korrelyatsii: polnaya tablitsa znacheniy i ikh interpretatsiya): [website]. [in Russian] (SkyPro. Коэффициент корреляции: полная таблица значений и их интерпретация: [сайт]). URL: https://sky.pro/wiki/analytics/koeffitsient-korrelyatsii-polnaya-tablitsa-znachenij-i-ih-interpretatsiya) [дата обращения: 14.11.2025].

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 [дата обращения: 14.11.2025].

Suvorov V.V. Sweet clover (Donnik). Leningrad; Moscow: Selkhozizdat; 1962. [in Russian] (Суворов В.В. Донник. Ленинград; Москва: Сельхозиздат; 1962).

Suvorov V.V. Sweet clover – *Melilotus* (Tourn.) Adans. In: *Flora of Cultivated Plants. Vol. 13.* Moscow; Leningrad: Selkhozgiz; 1950. p.345-502. [in Russian] (Суворов В.В. Донник – *Melilotus* (Tourn.) Adans. В кн.: *Культурная флора СССР. Т. 13*. Москва; Ленинград: Сельхозгиз; 1950. С.345-502).

Vavilov N.I. Five continents (Pyat kontinentov). Leningrad: Nauka; 1987. [in Russian] (Вавилов Н.И. Пять континентов. Ленинград: Наука; 1987).

Yushkevich L.V., Khamova O.F., Butko A.S. Agrophysical properties and soil fertility of the saline complex in the northern forest-steppe of the Omsk region. *Plodorodie = Soil Fertility*. 2025;1(142):42-45. [in Russian] (Юшкевич Л.В., Хамова О.Ф., Бутко А.С. Объемные деформации почв солонцового комплекса северной лесостепи Западной Сибири. *Плодородие*. 2025;1(142):42-45). DOI: 10.25680/S19948603.2025.142.09

Информация об авторах

Юрий Алексеевич Просвирин, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Кубанская опытная станция – филиал ВИР, 352183 Россия, Краснодарский край, Гулькевический район, п. Ботаника, ул. Центральная, 2, kos-vir@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-8018-824X

Ольга Владимировна Дук, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий специалист, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, duk-olg@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-9441-5802

Вера Владимировна Чумакова, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр, 356241 Россия, Михайловск, ул. Никонова, 49, sosna777@bk.ru, https://orcid.org/0000-0003-0913-6855

Information about the authors

Yuri A. Prosvirin, Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Kuban Experiment Station – branch of VIR, 2 Tsentralnaya St., Botanika Settlem., Gulkevichsky District, Krasnodar Territory 352183, Russia, kos-vir@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-8018-824X

Olga V. Duk, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Specialist, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, duk-olg@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-9441-5802

Vera V. Chumakova, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, North-Caucasian Federal Scientific Agrarian Center, 49 Nikonova St., Mikhailovsk 356241, Russia, sosna777@bk.ru, https://orcid.org/0000-0003-0913-6855

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: all the authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 06.08.2025; одобрена после рецензирования 29.11.2025; принята к публикации 16.01.2026.
The article was submitted on 06.08.2025; approved after reviewing on 29.11.2025; accepted for publication on 16.01.2026.

КОЛЛЕКЦИИ МИРОВЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СЕЛЕКЦИИ

Научная статья
УДК 633.511
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o21

CC BY

Влияние климата зоны полупустынь Астраханской области на хозяйственно ценные признаки хлопчатника

Р. К. Туз[1], Е. Г. Мягкова[1], К. В. Илларионова[2], Л. П. Подольная[3]

[1] *Прикаспийский аграрный федеральный научный центр Российской академии наук, Астраханская область, Россия*

[2] *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия*

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

Автор, ответственный за переписку: Лариса Петровна Подольная, l.podolnaya@vir.nw.ru

Актуальность. Потепление климата на планете позволило продвинуть на север такие теплолюбивые культуры, как хлопчатник, однако определение границ осеверения требует тщательного изучения характера изменчивости наиболее важных признаков для определения направлений селекции на юге России.
Материалы и методы. В 2022–2024 гг. на базе Прикаспийского аграрного федерального научного центра Российской академии наук по методике ВИР изучили 21 образец *Gossypium hirsutum* L. коллекции хлопчатника ВИР европейского и центрально-азиатского происхождения. Оценили четыре хозяйственно ценных признака и продолжительность периода «всходы – созревание». Проведены двухфакторный дисперсионный анализ и факторный анализ по методу главных компонент.
Результаты и заключение. Наилучшие показатели почти по всем признакам были получены в 2022 г., только масса хлопка-сырца одной коробочки оказалась заметно выше в 2024 г. Средние данные по выборке за 2023 и 2024 г. были близкими, но последний год был незначительно хуже. По результатам двухфакторного дисперсионного анализа установлено, что основная часть изменчивости у большинства признаков определяется генотипом, кроме продолжительности вегетационного периода. Влияние погодных условий также значимо. Факторный анализ подтвердил, что в условиях севера Астраханской области поздние образцы не будут продуктивными, а также что масса коробочки не коррелирует с продуктивностью. Выделены болгарские образцы с лучшими показателями за три года – к-7212, к-7214, к-7291 и к-7363. Изучение изменчивости хозяйственно ценных признаков и их взаимосвязей поможет определить направление селекции хлопчатника в конкретных условиях.

Ключевые слова: изменчивость, продуктивность, длина волокна, выход волокна

Благодарности: работа выполнена в рамках реализации государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту № 0481-2022-0005 «Растительные ресурсы масличных и прядильных культур ВИР как основа теоретических исследований и их практического использования».

Для цитирования: Туз Р.К., Мягкова Е.Г., Илларионова К.В., Подольная Л.П. Влияние климата зоны полупустынь Астраханской области на хозяйственно ценные признаки хлопчатника. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(1):140-151. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o21

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

© Туз Р.К., Мягкова Е.Г., Илларионова К.В., Подольная Л.П., 2026

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

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o4

Influence of the semidesert climate in Astrakhan Province on agronomic characters in cotton

Ruslan K.Tuz[1], Elena G. Myagkova[1], Kseniya V. Illarionova[2], Larisa P. Podolnaya[3]

[1] *Caspian Agrarian Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Astrakhan Province, Russia*

[2] *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia*

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

Corresponding author: Larisa P. Podolnaya, l.podolnaya@vir.nw.ru

Background. Expanding the area of cultivation for heat-loving crops, such as cotton, to the north due to climate change requires an insight into the nature of variability of the most important agronomic characters to formulate the tasks for breeders in the south of Russia. The harsh semidesert climate of Astrakhan Province serves well to identify heat- and drought-resistant cotton accessions.

Materials and methods. A set of 21 accessions of *Gossypium hirsutum* L. of European and Central Asian origin from the VIR collection were tested according to VIR's guidelines for four agronomic characters and the length of the germination-to-maturity period. The tests were performed in 2022–2024 at the Caspian Agrarian Federal Research Center (Chernoyarsky District, northwest of Astrakhan Province). Two-way ANOVA and principal component factor analysis (PCA) were applied using Excel 2016 and STATISTICA 7.0.

Results and conclusion. The best results for almost all characters were recorded in 2022, except for seed cotton weight per boll that was significantly higher in 2024. Average values for the tested set were comparable in 2023 and 2024, with the latter year slightly worse. ANOVA showed that the major part of variability for most characters was influenced by the genotype, except for the length of the growing season. The effect of weather conditions was also significant. PCA confirmed that late-ripening cultivars would not be productive in the north of Astrakhan Province, and that higher boll weight did not correlate with productivity, as midseason and late cultivars had larger bolls. Bulgarian accessions with the best performance over three years were selected: k-7212, k-7214, k-7291, and k-7363. The studied variability of important agronomic characters under the influence of weather conditions and their identified correlations will help to set priorities in cotton breeding for specific environments.

***Keywords*:** variability, productivity, fiber length, lint percentage

Acknowledgments: the study was conducted within the framework of the state task according to the theme plan of VIR under Project No. FGEM-2022-0005 "Plant resources of oil and fiber crops at VIR as the basis for theoretical research and their practical utilization".

For citation: Tuz R.K., Myagkova E.G., Illarionova K.V., Podolnaya L.P. Influence of the semidesert climate in Astrakhan Province on agronomic characters in cotton. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(1):140-151. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o21

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Изменение климата на планете за последние десятилетия (аридизация и значительное повышение температуры) по-разному отражается на различных отраслях сельского хозяйства, и последствия подробно изучаются (Podolnaya et al., 2011; Kucek et al., 2019; Besedina et al., 2021; etc.). Потепление климата негативно сказывается на возделывании такой ценной культуры, как хлопчатник (Williams et al., 2017). В традиционных хлопкосеющих странах ищут способы противостояния изменению условий возделывания (Adhikari et al., 2016; Li et al., 2019; Lin et al., 2024; etc.).

В то же время потепление климата позволило продвинуть на север такие теплолюбивые культуры, как арахис (Bemova et al., 2023), хлопчатник (Asfandiyarova, Shakhmedova, 1999; Podolnaya et al., 2015; etc.). Показано, что их можно успешно выращивать в нескольких районах на юге РФ, в том числе на севере Астраханской области, где расположен Прикаспийский аграрный федеральный научный центр Российской академии наук (ПАФНЦ РАН), в котором свыше 30 лет проводится изучение образцов хлопчатника коллекции ВИР. В последние десятилетия в Черноярском районе Астраханской области (табл. 1) наблюдается повышение суммы положительных температур, тем не менее погодные условия достаточно нестабильны (Zvolinski, 1991). Поэтому очень важно знать направление изменчивости основных хозяйственно ценных признаков под влиянием конкретных факторов, таких как температура и осадки, а также общие тенденции, характерные для данной климатической зоны.

Таблица 1. Сумма положительных температур
(Прикаспийский аграрный федеральный научный центр РАН, с. Соленое Займище)

Table 1. The sum of positive temperatures
(Caspian Agrarian Federal Research Center, Solenoe Zaimishche, Astrakhan Province)

Месяц / Month	Средняя многолетняя (1969–2014) / Long-term mean (1969–2014)	Средняя многолетняя (1978–2023) / Long-term mean (1978–2023)	2022	2023	2024
Май / May	527,0	382,2	454,3	336,7	264,4
Июнь / June	645,0	684,5	728,5	680.8	747,6
Июль / July	737,2	777,8	752,7	801,7	845,6
Август / August	685,5	740,4	878,5	832,9	696,4
Сентябрь / September	468,5	510,5	526,8	559,3	584,4
Итого / Sum	3063,2	3096,4	3340,8	3211,4	3138,4

Материалы и методы

ПАФНЦ РАН расположен в Черноярском районе Астраханской области (село Соленое Займище). Эта территория относится к полупустыне, климат резко континентальный, засушливый, часты суховеи. Среднесуточная температура воздуха за период вегетации хлопчатника составляет 20,1°С, среднегодовая сумма активных температур (выше 10°) – 3400–3450°С. Количество осадков за теплый период (апрель – октябрь) не превышает 155–160 мм, максимум осадков (около трети годовой суммы) приходится на апрель – июнь. Почвы светло-каштановые. Сумма положительных температур за 2022–2024 гг. и среднемноголетних приведены в таблице 1. Расчет среднемноголетних температур произведен по данным официально зарегистрированной метеостанции с синоптическим индексом 34578, координаты: 48,07 с. ш. и 46,07 в. д., высота над уровнем моря – 5 м (с. Черный Яр, Астраханская область). Сравнение среднемноголетних показателей и показателей за период изучения хлопчатника, отраженный в данной работе, говорит об очень заметном потеплении климата в регионе, некоторое понижение наблюдается только в мае. Однако последние три года наблюдалось постепенное снижение суммы положительных температур в начале сезона, что отразилось на результатах.

Среднемесячная температура и осадки за период вегетации хлопчатника показаны на рисунке 1.

Образцы средневолокнистого хлопчатника (*Gossypium hirsutum* L.) коллекции ВИР (21) различного происхождения, но достаточно скороспелые (табл. 2) изучались в течение трех лет (2022–2024 гг.).

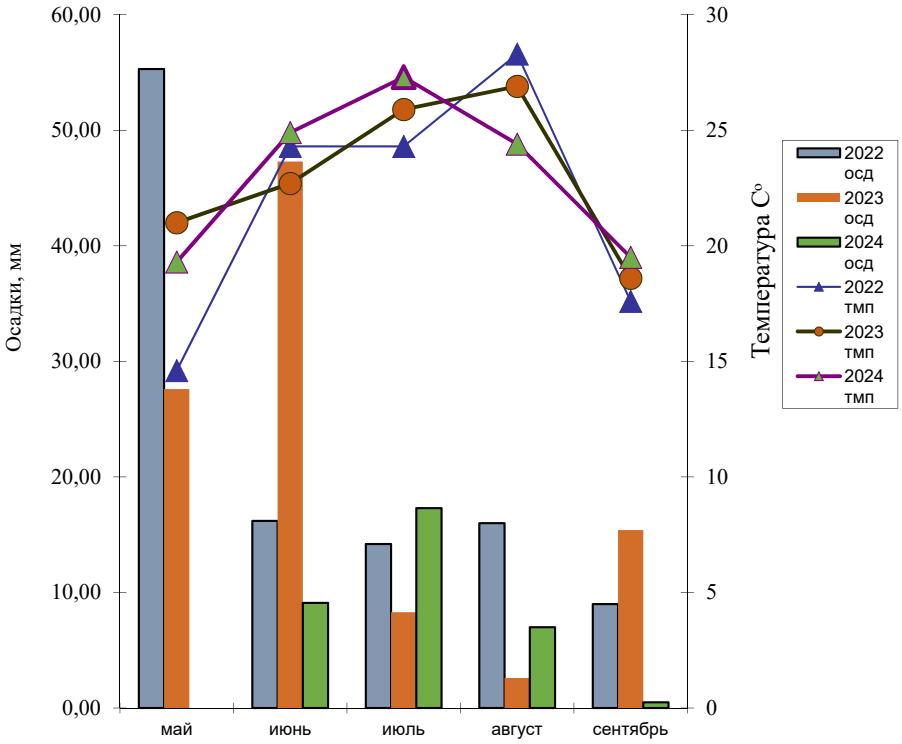
Образцы высевали в трех повторностях на пятиметровых однорядковых делянках с расстоянием 70 см между рядами. Посев производился вручную через 10–15 см (из расчета 100 000 растений на га). Хлопчатник выращивался на капельном орошении, норма полива за сезон составила 2600 м^3.

Учитывали продолжительность вегетационного периода и хозяйственно ценные признаки: «масса хлопка-сырца одной коробочки», «продуктивность», «длина волокна» и «выход волокна». Длина волокна определялась по 10 летучкам от 10 разных коробочек, остальные хозяйственно ценные признаки фиксировались для делянки в целом. Изучение проводили по методике ВИР (Davidyan et al., 1978).

Сделаны двухфакторный дисперсионный анализ и факторный анализ по методу главных компонент. Использовались программы Excel 2016 и STATISTICA 7.0.

Результаты и обсуждение

Погодные условия двух лет изучения сильно различались. В 2022 г. май был прохладным и дождливым, всходы получили довольно поздно, но жаркие июль и август



осд – осадки, тмп – температура (°С) /осд – rainfall, тмп – temperature (°С)

Рис. 1. Погодные условия вегетационного периода
(Прикаспийский аграрный федеральный научный центр РАН, с. Соленое Займище, 2022–2024 гг.)

Fig. 1. Weather conditions during the growing season
(Caspian Agrarian Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Solenoe Zaimishche, Astrakhan Province, 2022–2024)

Таблица 2. Список изученных образцов хлопчатника
(Прикаспийский аграрный федеральный научный центр РАН, с. Соленое Займище, 2022–2024 гг.)

Table 2. List of the studied cotton accessions
(Caspian Agrarian Federal Research Center, Solenoe Zaimishche, Astrakhan Province, 2022–2024)

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Название образца / Accession name	Происхождение образца / Origin of accessions
8065	‘АС-1’	Россия
3183	Ю-127	РСФСР, Дагестан, Хасав-Юрт
3184	Ю-144	РСФСР, Дагестан, Хасав-Юрт
3185	Ю-190	РСФСР, Дагестан, Хасав-Юрт
3186	Ю-178	РСФСР, Дагестан, Хасав-Юрт
3187	Ю-158	РСФСР, Дагестан, Хасав-Юрт
3191	Ю-191	РСФСР, Дагестан, Хасав-Юрт
7212	N26	Болгария
7213	N432	Болгария
7214	N433	Болгария
7215	N581	Болгария
7216	N996	Болгария
7217	N146	Болгария

Таблица 2. Окончание
Table 2. The end

№ по каталогу ВИР /	Название образца /	Происхождение образца /
7218	N241	Болгария
7219	N10-I	Болгария
7291	N114	Болгария
7363	N501	Болгария
7478	'Киргизский-3'	Киргизия
7481	'Чимбай-4007'	Узбекистан, Каракалпакия, Чимбай
7483	'Чимбай-4047'	Узбекистан, Каракалпакия, Чимбай
7877	N436	Болгария

и сухой и теплый сентябрь (сумма положительных температур в этом месяце значительно превышала среднемноголетнюю, см. табл. 1) компенсировали недостаток тепла в начале сезона. В отличие от предыдущего, в 2023 г. прохладными и влажными были вторая половина июня и начало июля (см. табл. 1, рис. 1), что затормозило развитие растений, поэтому продуктивность большинства образцов оказалась ниже прошлогодней (табл. 4), а продолжительность периода «всходы – созревание» – больше (табл. 3). В 2024 г., несмотря на благоприятные для роста и развития хлопчатника условия мая – июня и жаркий июль, хороших результатов не удалось достичь, так как из-за пониженных температур августа раскрытие коробочек задержалось.

Показатели по выборке (табл. 5) свидетельствуют, что наилучшие результаты почти по всем признакам были получены в 2022 г., только масса хлопка-сырца одной коробочки оказалась заметно выше в 2024 г. Однако продуктивность в этом году была самой низкой за три года. То есть относительно низкие температуры августа задержали раскрытие коробочек, но позволили сформироваться более крупным коробочкам. Этот факт говорит о том, что в наших условиях продуктивность не зависит от массы коробочек, так как не все коробочки успевают созреть. Средние показатели по выборке за 2023 и 2024 г. показали близкие значения, но последний год был незначительно хуже, хотя у отдельных образцов (к-3185, к-3186, к-7214) продуктивность в 2024 г. была

Таблица 3. Характеристика сортов хлопчатника по хозяйственно ценным и фенологическому признакам
(Прикаспийский аграрный федеральный научный центр РАН, с. Соленое Займище, 2022–2024 гг.)

Table 3. Data of agronomic and phenological characters of cotton cultivars
(Caspian Agrarian Federal Research Center, Solenoe Zaimishche, Astrakhan Province, 2022–2024)

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Продолжительность периода «всходы – созревание», дн. / Germination-to-maturity period, days				Длина волокна, мм / Fiber length, mm				Выход волокна, % / Lint percentage, %			
	2022	2023	2024	X	2022	2023	2024	X	2022	2023	2024	X
'AC-1', st	93	124	116	111	32,7	30,3	30,3	31,1	39,66	34,8	33,4	36,0
3183	116	128	110	118	31,5	31,1	30,9	31,2	30,0	32,6	25,9	29,5
3184	116	128	110	118	33,4	32,0	31,5	32,3	31,3	29,8	27,0	29,4
3185	112	128	110	117	33,0	31,9	32,6	32,5	30,9	29,4	33,3	31,2
3186	117	124	108	116	32,4	31,1	31,0	31,5	35,6	32,6	32,9	33,7
3187	127	140	131	133	31,7	30,5	29,4	30,5	32,3	31,6	31,7	31,9
3191	102	128	108	113	29,0	30,1	31,6	30,2	31,5	32,0	35,1	32,9
7212	106	116	110	111	32,8	32,4	31,5	32,2	39,7	36,4	38,0	38,0
7213	117	124	129	123	33,7	31,7	32,0	32,5	40,5	39,1	36,6	38,7
7214	106	121	133	120	32,0	31,2	30,8	31,3	36,8	33,5	35,9	35,4
7215	112	121	135	123	31,5	30,2	31,5	31,1	39,3	33,7	35,8	36,3
7216	117	140	135	131	30,8	31,5	32,7	31,7	34,3	36,1	33,9	34,8

Таблица 3. Окончание
Table 3. The end

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Продолжительность периода «всходы – созревание», дн. / Germination-to-maturity period, days				Длина волокна, мм / Fiber length, mm				Выход волокна, % / Lint percentage, %			
	2022	2023	2024	X	2022	2023	2024	X	2022	2023	2024	X
7217	104	110	135	116	33,4	32,1	31,8	32,4	34,7	32,6	33,3	33,5
7218	110	118	133	120	32,5	31,9	30,7	31,7	32,4	30,6	34,1	32,4
7219	102	124	135	120	33,0	31,4	31,9	32,1	38,3	36,2	31,4	35,3
7291	95	110	135	113	32,5	32,5	32,5	32,5	34,0	34,0	35,2	34,4
7363	96	124	135	118	34,0	32,4	31,6	32,7	39,4	37,4	31,4	36,1
7478	129	110	135	125	32,8	31,3	29,8	31,3	40,3	39,4	37,5	39,1
7481	98	110	135	114	31,0	32,1	31,6	31,6	33,8	31,6	30,7	32,0
7483	131	110	137	126	33,5	31,7	32,0	32,4	32,4	30,7	29,8	31,0
7877	96	110	135	114	32,6	31,4	31,2	31,7	39,3	34,8	31,9	35,3
Xср.	110	121	126	119	32,4	31,5	31,4	31,7	35,5	33,8	33,1	34,1
НСР	6	5	6	3	0,6	0,4	0,4	0,3	1,8	1,4	1,5	1,4

Примечание: X – среднее значение; st – стандарт; НСР – наименьшая существенная разница
Note: X – mean value; st – reference standard; HCP – least significant difference

Таблица 4. Характеристика сортов хлопчатника по продуктивности
(Прикаспийский аграрный федеральный научный центр РАН, с. Соленое Займище, 2022–2024 гг.)
Table 4. Productivity data of cotton cultivars
(Caspian Agrarian Federal Research Center, Solenoe Zaimishche, Astrakhan Province, 2022–2024)

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Масса хлопка-сырца одной коробочки, г / Seed cotton weight per boll, g				Продуктивность, г / Productivity, g			
	2022	2023	2024	X	2022	2023	2024	X
'AC-1', st	5,3	5,4	7	5,9	29,0	25,8	31,6	28,8
3183	4,4	4,9	4,8	4,7	27,3	24,8	9,7	20,6
3184	5,3	5,4	5,6	5,4	26,0	28,4	29,3	27,9
3185	4,9	5,0	5,9	5,3	28,1	24,0	32,8	28,3
3186	5,2	5,4	5,5	5,4	29,3	20,5	34,8	28,2
3187	4,4	4,9	5,8	5,0	29,5	14,3	14,7	19,5
3191	4,1	4,6	6,4	5,0	36,0	28,3	32,7	32,3
7212	5,1	5,2	6,0	5,4	40,4	27,2	24,3	30,6
7213	5,8	5,5	6,4	5,9	25,0	19,6	22,5	22,4
7214	4,7	4,9	6,3	5,3	28,4	20,3	35,7	28,1
7215	4,7	4,5	5,4	4,9	33,2	29,3	24,5	29,0
7216	4,5	4,9	4,5	4,6	35,0	28,5	16,7	26,7
7217	4,9	5,2	5,2	5,1	36,9	19,8	23,6	26,8
7218	5,1	5,0	5,6	5,2	41,6	29,1	21,3	30,7

Таблица 4. Окончание
Table 4. The end

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Масса хлопка-сырца одной коробочки, г / Seed cotton weight per boll, g				Продуктивность, г / Productivity, g			
	2022	2023	2024	X	2022	2023	2024	X
7219	5,0	4,8	5,6	5,1	37,2	26,8	18,6	27,5
7291	4,4	4,4	5,6	4,8	39,7	39,7	33,1	37,5
7363	4,2	4,6	6,5	5,1	41,6	38,6	32,5	37,6
7478	5,7	5,2	5,6	5,5	32,7	19,5	14,2	22,1
7481	5,7	5,5	6,3	5,8	27,8	21,3	29,1	26,1
7483	6,1	5,8	6,6	6,2	27,4	25,3	8,2	20,3
7877	5,9	5,4	6,3	5,9	45,8	32,6	25,0	34,5
X	5,0	5,1	5,9	5,3	33,2	25,9	24,5	27,9
HCP	0,3	0,2	0,3	0,2	3,0	3,1	4,1	2,5

Примечание: X – среднее значение; st – стандарт; HCP – наименьшая существенная разница

Note: X – mean value; st – reference standard; HCP – least significant difference

Таблица 5. Характеристика признаков хлопчатника по годам для выборки в целом
(Прикаспийский аграрный федеральный научный центр РАН, с. Соленое Займище, 2022–2024 гг.)

Table 5. Values of cotton characters by years for the entire set of accessions
(Caspian Agrarian Federal Research Center, Solenoe Zaimishche, Astrakhan Province, 2022–2024)

Статистические параметры / Statistics parameters	Годы / Years		
	2022	2023	2024
Межфазный период «всходы – созревание» (дн.) / Germination-to-maturity period (days)			
X	110	121	126
Min	93	110	108
Max	131	140	137
Std. Dev.	11,3	9,3	11,7
Масса хлопка-сырца коробочки (г) / Seed cotton weight per boll (g)			
X	5,0	5,1	5,9
Min	4,1	4,4	4,5
Max	6,1	5,8	7,0
Std. Dev.	0,6	0,4	0,6
Продуктивность (г) / Productivity (g)			
X	33,2	25,9	24,5
Min	25,0	14,3	8,2
Max	45,8	39,7	35,7
Std. Dev.	6,1	6,2	8,4
Длина волокна (мм) / Fiber length (mm)			
X	35,2	33,5	31,4
Min	30,0	29,4	29,4

Таблица 5. Окончание
Table 5. The end

Статистические параметры / Statistics parameters	Годы / Years		
	2022	2023	2024
Длина волокна (мм) / Fiber length (mm)			
Max	40,5	39,4	32,7
Std. Dev.	3,5	3,0	0,9
Выход волокна (%) / Lint percentage (%)			
X	35,5	33,8	33,1
Min	30,0	29,4	25,9
Max	40,5	39,4	38,0
Std. Dev.	3,6	2,9	3,1

Примечание: X – среднее значение; Min – минимальное значение признака; Max – максимальное значение признака; Std. Dev. – стандартное отклонение

Note: X – mean value; Min – minimum; Max – maximum; Std. Dev – standard deviation

выше, чем в 2023 и даже в 2022 г. Вероятно, этим образцам требуется менее жаркая погода в период формирования и созревания коробочек. Размах изменчивости по выборке почти по всем признакам за три года был близким, лишь в 2023 г. он снизился по продолжительности межфазного периода «всходы – созревание», а в 2024 – по длине волокна (см. табл. 5).

Влияние генотипа и условий среды изучено методом двухфакторного дисперсионного анализа. Выявлены достоверные отличия между образцами почти по всем признакам, то есть большая часть изменчивости этих признаков определяется генотипом. Только по продолжительности вегетационного периода (табл. 6) образцы достоверно не различались, так как вектор изменчивости по годам у образцов данной выборки разнонаправлен и образцы достаточно близки по этому показателю, поскольку для этого исследования они отбирались из зон с близкими климатическими параметрами. Влияние погодных условий на все признаки было не слишком велико, но достоверно.

Признаком, в большей степени определяемым генотипом, является выход волокна – 68%. Стабильность этого признака подтверждается и другими исследованиями (Zvolinski et al., 2006; etc.). Доля влияния погодных условий на этот признак хотя и невелика – 10%, но достоверна. Наибольшее влияние погода оказывала на массу хлопка-сырца одной коробочки – 35%, а также на продолжительность вегетационного периода –30%. Послед-

Таблица 6. **Влияние генотипа и погодных условий на изменчивость признаков хлопчатника**
(Прикаспийский аграрный федеральный научный центр РАН, с. Соленое Займище, 2022–2024 гг.)

Table 6. **Effects of the genotype and weather conditions on the overall variability of cotton characters**
(Caspian Agrarian Federal Research Center, Solenoe Zaimishche, Astrakhan Province, 2022–2024)

Признак / Character	Степень влияния генотипа и условий среды на изменчивость признака (%) / Effect size of the genotype and weather conditions for the overall variability of cotton characters (%)		
	Генотип / Genotype	Условия среды / Weather conditions	Случайные факторы / Random factors
Продолжительность межфазного периода «всходы – созревание» (дн.) / Germination-to-maturity period (days)	21	30**	49
Масса хлопка-сырца одной коробочки (г) / Seed cotton weight per boll (g)	42**	35**	23
Продуктивность (г) / Productivity (g)	40*	24**	36
Длина волокна (мм) / Fiber length (mm)	44**	20**	36
Выход волокна (%) / Lint percentage (%)	68**	10**	24

Примечание: * – влияние фактора достоверно при P ≤ 0,05; ** – влияние фактора достоверно при P ≤ 0,01

Note: * – the factor's effect is significant at $P \leq 0.05$; ** – the factor's effect is significant at $P \leq 0.01$

ний признак характеризуется и наибольшей долей влияния случайных факторов (49%).

Факторный анализ данных трехлетнего изучения дал общую картину взаимодействия признаков.

Мы ограничились рассмотрением первых двух факторов (F1 и F2), на долю которых приходится свыше 60% изменчивости (табл. 7). По значениям факторов для каждого признака мы можем судить о взаимосвязях признаков. Это отражено на рисунке 2.

Высокую положительную корреляцию с первым фактором показала продуктивность (0,84), поэтому первый фактор можно назвать фактором продуктивности. Высокую отрицательную корреляцию проявила продолжительность межфазного периода «всходы – созревание»

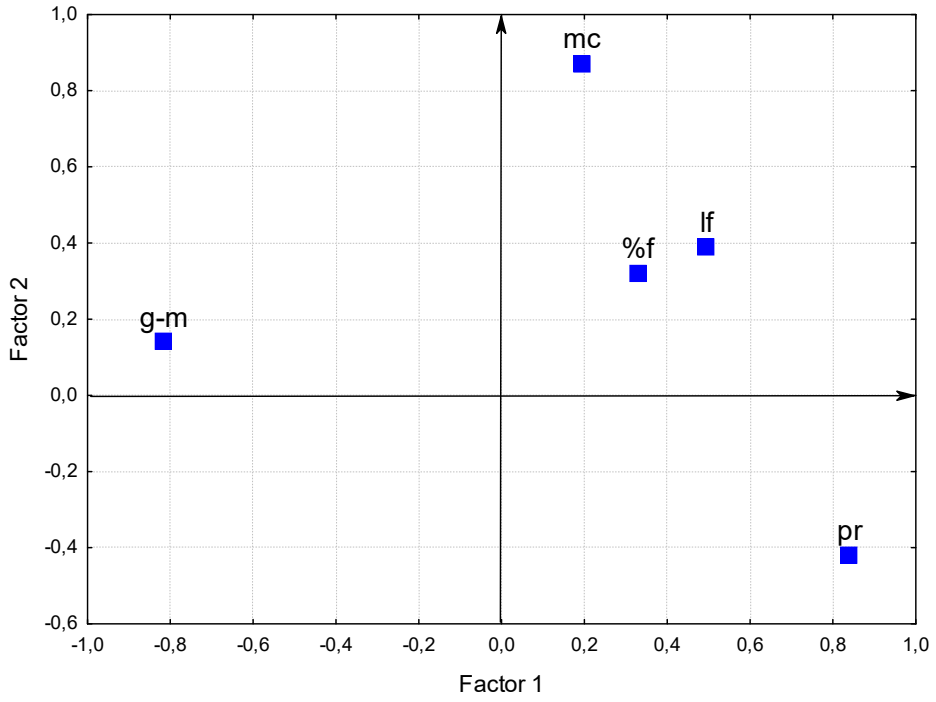
Таблица 7. Факторные нагрузки для пяти признаков хлопчатника
(Прикаспийский аграрный федеральный научный центр РАН, с. Соленое Займище, 2022–2024 гг.)

Table 7. Factor loadings for five characters in cotton
(Caspian Agrarian Federal Research Center, Solenoe Zaimishche, Astrakhan Province, 2022–2024)

Признак / Character	F1	F2
Продолжительность межфазного периода «всходы – созревание» (дн.) / Germination-to-maturity period (days)	**–0,81**	0,15
Масса хлопка-сырца одной коробочки (г) / Seed cotton weight per boll (g)	0,18	**0,87**
Продуктивность (г) / Productivity (g)	**0,84**	–0,45
Длина волокна (мм) / Fiber length (mm)	0,49	0,39
Выход волокна (%) / Lint percentage (%)	0,34	0,34
Expl. Var	1,76	1,21
Prp. Totl	0,35	0,24

Примечание: Expl. Var – общая дисперсия фактора, Prp. Totl – доля общей дисперсии

Note: Expl. Var – explained variance, Prp. Totl – proportion of total variance



g-m – продолжительность межфазного периода «всходы – созревание», mc – масса хлопка-сырца одной коробочки, pr – продуктивность одного растения, lf – длина волокна, %f – выход волокна /
g-m – germination-to-maturity period, mc – seed cotton weight per boll, pr – productivity per plant, lf – fiber length, %f – lint percentage

Рис. 2. Расположение признаков хлопчатника в факторном пространстве
(Прикаспийский аграрный федеральный научный центр РАН, с. Соленое Займище, 2022–2024 гг.).

Fig. 2. Distribution of cotton characters in the factor space
(Caspian Agrarian Federal Research Center, Solenoe Zaimishche, Astrakhan Province, 2022–2024)

(–0,81), что говорит о большей продуктивности скороспелых образцов. Масса хлопка-сырца одной коробочки имела слабую положительную связь с этим фактором (0,18), но высокую положительную связь со вторым фактором (0,87), поэтому второй фактор – фактор массы хлопка-сырца одной коробочки. Продуктивность имела среднюю отрицательную связь с этим фактором (–0,45), что говорит о том, что у продуктивных образцов коробочки были в целом мельче. Сходные результаты получены нами в Соленом Займище и на других образцах хлопчатника (Podolnaya et al., 2023). Однако в Италии в более благоприятных условиях, чем север Астраханской области, выявилась положительная связь между продуктивностью и массой хлопка-сырца одной коробочки (Zvolinski et al., 2006). Длина и выход волокна размещаются в середине правой верхней четверти, что опровергает общепринятое мнение об антагонизме этих признаков (Asfandiyarova, Shakhmedova, 1999; etc.).

По значениям факторов для каждого образца мы можем судить об их относительном взаиморасположении. Эта картина отражена на рисунке 3.

По комплексу признаков за три года выделились болгарские образцы – N26 (к-7212) и N433 (к-7214). Также образцы из Болгарии – N114 (к-7291) и N501 (к-7363) – показали высокую продуктивность, но у них немного хуже длина и выход волокна. Сорт-стандарт 'АС-1' располагается в правой верхней четверти близко к центру, что говорит о том, что у него значения всех оцененных признаков чуть лучше средних. Наилучшим сочетанием показателей длины и выхода волокна характеризуется болгарский образец N432 (к-7213), но продуктивность у него средняя, что отражает его размещение на графике – высокое положение по второму фактору и центральное – по первому. Центрально-азиатские и дагестанские образцы находятся либо в левой половине графика, либо в самом центре. Это говорит об их невысокой продуктивности и позднеспелости в конкретных условиях.

Данные факторного анализа подтверждают ранжирование по исходным значениям продолжительности межфазного периода «всходы – созревание», массы хлопка-сырца одной коробочки, продуктивности, но дополнительно дают возможность группировки образцов по комплексу признаков.

Заключение

В 2022–2024 гг. в ПАФНЦ РАН оценены продолжительность вегетационного периода и четыре хозяйственно ценных признака 21 образца средневолокнистого хлопчатника (*G. hirsutum*). При общем потеплении климата на планете, отмечаемого в последние десятилетия (Williams et al., 2017), в течение трех последних лет в Соленом Займище постепенно уменьшалась годовая сумма положительных температур, что привело к последовательному ухудшению средних показателей по выборке по всем параметрам, в том числе и по выходу волокна – наиболее стабильному признаку. Единственное исключение – масса хлопка-сырца одной коробочки, оказавшаяся наибольшей в 2024 г.

По результатам двухфакторного дисперсионного анализа установлено, что основная часть изменчивости у большинства признаков определяется генотипом, хотя влияние погодных условий также значимо. Лишь для изменчивости продолжительности вегетационного периода влияние генотипа не значимо.

Факторный анализ по методу главных компонент подтвердил, что в условиях севера Астраханской области поздние образцы не будут продуктивными, а также

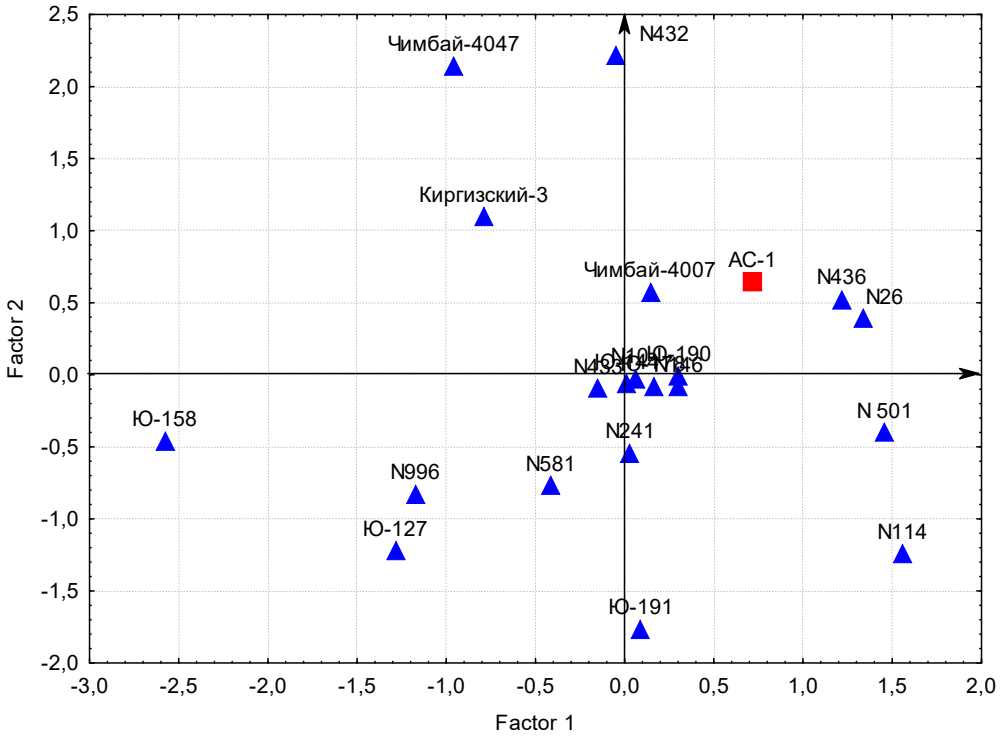


Рис. 3. Расположение образцов хлопчатника в факторном пространстве
(Прикаспийский аграрный федеральный научный центр РАН, с. Соленое Займище, 2022–2024 гг.)

Fig. 3. Distribution of cotton accessions in the factor space
(Caspian Agrarian Federal Research Center, Solenoe Zaimishche, Astrakhan Province, 2022–2024)

что большая масса коробочки не коррелирует с продуктивностью, так как крупными коробочками характеризуются среднеспелые и позднеспелые образцы. Разница в массе коробочек в 1–2 грамма не может компенсировать раннюю закладку генеративных побегов и ускоренную динамику раскрытия коробочек у раннеспелых образцов. Поэтому для севера Астраханской области подходят скороспелые образцы с коробочками не крупнее 4,5–5,0 г. Отсутствие отрицательной корреляции между длиной и выходом волокна показывает, что реально создавать сорта с хорошими показателями обоих признаков.

Выявлены наиболее пластичные образцы, имевшие лучшие показатели по всем признакам за три года. Интересно, что такие показатели наблюдались у ряда болгарских образцов селекции 70–80-х годов прошлого века. Возможно, из-за изменения климата условия севера Астраханской области приблизились к условиям Болгарии середины прошлого века.

Сравнение результатов за три года подтверждает, что решающим фактором для получения хорошего урожая в условиях юга России являются высокие температуры августа (Podolnaya et al., 2011), а также сумма положительных температур, хотя некоторые старые образцы из Дагестана дали лучшие результаты в менее жарком 2024 г. Поэтому изучение изменчивости хозяйственно ценных признаков и их взаимосвязей у образцов коллекции хлопчатника ВИР под влиянием меняющихся погодных условий поможет определить направление селекции. По результатам изучения можно сделать вывод, что сорта должны быть менее требовательными к теплу в первые месяцы вегетации, но отличаться жаро- и засухоустойчивостью.

References / Литература

Adhikari P., Ale S., Bordovsky J.P., Thorp K.R., Modala N.R., Rajan N. et al. Simulating future climate change impacts on seed cotton yield in the Texas High Plains using the CSM-CROPGRO-Cotton model. *Agricultural Water Management*. 2016;164(2):317-330. DOI: 10.1016/j.agwat.2015.10.011

Asfandiyarova M.Sh., Shakhmedova G.S. Cotton crop in Astrakhan Province (Kultura khlopchatnika v Astrakhanskoy oblasti). In: *Increasing Productivity and Protecting Arid Landscapes (Povysheniye produktivnosti i okhrana aridnykh landshaftov)*. Moscow: Moscow University; 1999. p.191-194. [in Russian] (Асфандиярова М.Ш., Шахмедова Г.С. Культура хлопчатника в Астраханской области. В кн.: *Повышение продуктивности и охрана аридных ландшафтов*. Москва: Московский университет; 1999. С.191-194).

Bemova V.D., Asfandiyarova M.Sh., Yakusheva T.V., Gavrilova V.A., Kishlyan N.V. Ecogeographic study of peanut accessions from the VIR collection. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(3):79-89. [in Russian] (Бемова В.Д., Асфандиярова М.Ш., Якушева Т.В., Гаврилова В.А, Кишлян Н.В. Эколого-географическое изучение образцов арахиса коллекции ВИР. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(3):79-89). DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-79-89

Besedina T.D., Boyko A.P., Tutberidze Ts.V., Kiseleva N.S. Specific nature of the integrative (complex) effect of environmental factors on hazelnut cultivars in the Russian humid subtropics. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021;182(1):22-32. [in Russian] (Беседина Т.Д., Бойко А.П., Тутберидзе Ц.В., Киселева Н.С. Специфика интегративного (комплексного) действия факторов внешней среды влажных субтропиков России на сорта культуры фундука. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2021;182(1):22-32). DOI: 10.30901/2227-8834-2021-1-22-32

Davidyan G.G., Rykova R.P., Kutuzova S.N., Vakhrusheva T.E., Drugova I.F., Rumyantseva L.T. Studying fiber plant collections (cotton, flax, and hemp). Guidelines (Izucheniye kollektsiy pryadilnykh rasteniy [khlopchatnik, len, konoplya]. Metodicheskiye ukazaniya). Leningrad: VIR; 1978. [in Russian] (Давидян Г.Г., Рыкова Р.П., Кутузова С.Н., Вахрушева Т.Е., Другова И.Ф., Румянцева Л.Т. Изучение коллекций прядильных растений (хлопчатник, лен, конопля). Методические указания. Ленинград: ВИР; 1978).

Kucek L.K., Riday H., Ehlke N., Reberg-Horton C., Maul J., Mirsky S.B. et al. Environmental influences on the relationship between fall and spring vigor in hairy vetch. *Crop Science*. 2019;59(6):2443-2454. DOI: 10.2135/cropsci2018.09.0569

Li N., Lin H., Wang T., Li Y., Liu Y., Chen X. et al. Impact of climate change on cotton growth and yields in Xinjiang, China. *Field Crops Research*. 2020;247:107592. DOI: 10.1016/j.fcr.2019.107590

Lin S., Wang Q., Deng M., Su L., Wei K., Guo Y., Zhang J. Assessing the influence of water fertilizer, and climate factors on seed cotton yield under mulched drip irrigation in Xinjiang Agricultural Regions. *European Journal of Agronomy*. 2024;152:127034. DOI: 10.1016/j.eja.2023.127034

Podolnaya L.P., Grigorev S.V., Illarionova K.V., Asfandiarova M. Sh., Tuz R.K., Khodjaeva N.A., Miroshnichenko E.V. Cotton in Russia. Actuality and prospect. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2015;29(7):56-58. [in Russian] (Подольная Л.П., Григорьев С.В., Илларионова К.В., Асфандиярова М.Ш., Туз Р.К., Ходжаева Н.А., Мирошниченко Е.В. Хлопчатник в России. Актуальность и перспективы. *Достижения науки и техники АПК*. 2015;29(7):56-58).

Podolnaya L.P., Grigoriev S.V., Myagkova E.G. VIR cotton collection accessions of different origin for breeding in the North Caspian conditions. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2023;6(4):3-102. [in Russian] (Подольная Л.П., Григорьев С.В., Мягкова Е.Г. Образцы коллекции хлопчатника различного происхождения для селекции в условиях Северного Прикаспия. *Биотехнология и селекция растений*. 2023;6(4):3-102). DOI: 10.30901/2658-6266-2023-4-o3

Podolnaya L.P., Kushnareva T.A., Khodzhaeva N.A. Analysis of the effect of weather conditions on the development of cotton accessions at Budennovsk experimental site of the Vavilov Institute (southeast of Stavropol Territory). *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2011;167:112-124. [in Russian] (Подольная Л.П., Кушнарева Т.А. Ходжаева Н.А. Анализ зависимости развития образцов хлопчатника от погодных условий Буденновского опорного пункта ВИР (юго-восток Ставропольского края). *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2011;167:112-124).

Williams A.A.J., McRae D., Kouadio L., Mushtaq Sh., Davis P. Cotton and climate change. In: J.L. Hatfield, M.V.K. Sivakumar, J.H. Prueger (eds). *Agronomy Monographs. Vol. 60. Agroclimatology: Linking Agriculture to Climate*. Madison, WI: American Society of Agronomy; 2018. p.343-368. DOI: 10.2134/agronmonogr60.2016.0009

Zvolinski V.P. Integrated development of multisectoral agricultural production in the Lower Volga agroindustrial system (Kompleksnoye razvitiye mnogootraslevogo selskokhozyaystvennogo proizvodstva v sisteme APK Nizhney Volgi). Moscow: RUDN; 1991. [in Russian] (Зво-

линский В.П. Комплексное развитие многоотраслевого сельскохозяйственного производства в системе АПК Нижней Волги. Москва: РУДН; 1991).

Zvolinski V.P., Podolnaya L.P., Asfandiyarova M.Sh., Tuz R.K., Sonnino A., Piscioneri I. An ecogeographic study of cotton accessions from the VIR collection under contrasting conditions of the south of Italy and north of Astrakhan Province (Ekologo-geograficheskoye izucheniye obraztsov khlopchatnika kollektsii VIR v kontrastnykh usloviyakh yuga Italii i severa Astrakhanskoy oblasti). In: *Collection of Scientific Papers of the Caspian Research Institute for Arid Farming. Vol. 5 (Sbornik trudov Prikaspiyskogo NII aridnogo zemledeliya. T. 5)*. Solenoe Zaimishche; 2006. p.195-205. [in Russian] (Зволинский В.П., Подольная Л.П., Асфандиярова М.Ш., Туз Р.К., Sonnino A., Piscioneri I. Эколого-географическое изучение образцов хлопчатника коллекции ВИР в контрастных условиях юга Италии и севера Астраханской области. В кн.: *Сборник трудов Прикаспийского НИИ аридного земледелия. Т. 5*. Соленое Займище; 2006. С.195-205).

Информация об авторах

Руслан Константинович Туз, кандидат сельскохозяйственных наук, ученый секретарь, Прикаспийский аграрный федеральный научный центр Российской академии наук, 416251 Россия, Астраханская обл., Черноярский р-н, с. Соленое Займище, Квартал Северный, 8, tuzzz@hotbox.ru

Елена Георгиевна Мягкова, научный сотрудник, врио заведующего лабораторией, Прикаспийский аграрный федеральный научный центр Российской академии наук, 416251 Россия, Астраханская обл., Черноярский р-н, с. Соленое Займище, Квартал Северный, 8, govsan29@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0631-9253

Ксения Викторовна Илларионова, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251 Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, elkv@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2563-6094

Лариса Петровна Подольная, 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.podolnaya@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4962-1989

Information about the authors

Ruslan K. Tuz, Cand. Sci. (Agriculture), Scientific Secretary, Caspian Agrarian Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 8 Severny Block, Solenoe Zaimishche, Chernoyarsky District, Astrakhan Province 416251, Russia, tuzzz@hotbox.ru

Elena G. Myagkova, Researcher, Acting Head of a Laboratory, Caspian Agrarian Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 8 Severny Block, Solenoe Zaimishche, Chernoyarsky District, Astrakhan Province 416251, Russia, govsan29@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0631-9253

Kseniya V. Illarionova, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Polytekhnicheskaya Street, St. Petersburg 195251, Russia, elkv@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2563-6094

Larisa P. Podolnaya, 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.podolnaya@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4962-1989

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 25.07.2025; одобрена после рецензирования 26.12.2025; принята к публикации 10.02.2026.
The article was submitted on 25.07.2025; approved after reviewing on 26.12.2025; accepted for publication on 10.02.2026.

КОЛЛЕКЦИИ МИРОВЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СЕЛЕКЦИИ

Научная статья
УДК 634.75:632(470.23/.25)
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o15

CC BY

Дикие виды рода *Fragaria* L. как источник хозяйственно ценных признаков для селекции в Северо-Западном регионе России

А. А. Харченко, Л. Ю. Новикова

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

Автор, ответственный за переписку: Анастасия Анатольевна Харченко, akkhara47@yandex.ru

Актуальность. Изменение климата требует адаптации регионального сортимента земляники ананасной, или садовой (*Fragaria × ananassa* (Weston) Duchesne ex Rozier). Перед селекционерами стоит задача выведения сортов, адаптированных к более высоким температурам лета и осени, устойчивых к зимним оттепелям.
Материалы и методы. В 2022–2025 гг. на научно-производственной базе «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» изучали фенологические, потребительские характеристики, урожайность, зимостойкость и устойчивость к болезням и вредителям 108 образцов рода *Fragaria* L. из коллекции ВИР, включающих сорта, дикие виды и гибриды.
Результаты. Анализ главных компонент изученных признаков показал, что основным дифференцирующим виды признаком является число ягод на растении, связанное с продолжительностью цветения и плодоношения. По ряду признаков имеются образцы диких видов, превосходящие сорта. *F. vesca* L. имеет потенциал раннего срока созревания ягод, устойчивости к угловатой пятнистости, серой гнили; источником зимостойкости могут быть *F. moschata* Duchesne ex Weston и *F. viridis* (Duchesne) Weston; *F. viridis* и *F. orientalis* Losinsk. обладают комплексной устойчивостью к пятнистостям листьев и серой гнили; *F. mandshurica* Staudt и *F. chiloensis* (L.) Mill. – к серой гнили. Дикие образцы *F. moschata* показали урожайность 83,9 и 93,9 ц/га, что в сочетании с высокой органолептической оценкой делает перспективным их возделывание для любительского садоводства Северо-Запада. Выделены высокоурожайные сорта *F. × ananassa*, дающие больше 150 ц/га: ‘Владыка Зосима’, ‘Купава’, ‘Ярославна’, ‘Бова’, ‘Альтаир’, ‘Дуэт’, ‘Гейзер’, ‘Форсаж’, ‘Даренка’, ‘Торпеда’, ‘Акварель’, ‘Бердский Рубин’, ‘Танюша’, ‘Jonsok’, ‘Забелинская’.
Заключение. Дикие виды рода *Fragaria* L. представляют собой перспективный источник устойчивости к болезням, вкусовых качеств, раннеспелости для расширения сортимента культивируемых видов земляники за счет как отдаленной гибридизации, так и увеличения количества возделываемых видов.

Ключевые слова: земляника, коллекция, фенология, урожайность, дегустационная оценка, устойчивость

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту № FGEM-2022-0004 «Совершенствование подходов и методов *ex situ* сохранения идентифицированного генофонда вегетативно размножаемых культур и их диких родичей, разработка технологий их эффективного использования в селекции».

Для цитирования: Харченко А.А., Новикова Л.Ю. Дикие виды рода *Fragaria* L. как источник хозяйственно ценных признаков для селекции в Северо-Западном регионе России. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(1):152-164. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o15

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

© Харченко А.А., Новикова Л.Ю., 2026

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

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o15

Wild species of *Fragaria* L. as a source of valuable agronomic traits for breeding in Northwest Russia

Anastasiia A. Kharchenko, Liubov Yu. Novikova

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

Corresponding author: Anastasiia A. Kharchenko, akkhara47@yandex.ru

Background. Climate warming requires adaptation of the regional assortment of garden strawberries (*Fragaria* L.). Breeders face the task of producing new cultivars adapted to higher temperatures in summer and autumn, with resistance to winter thaws.
Materials and methods. In 2022–2025, 108 *Fragaria* accessions from the VIR collection, including cultivars, wild species, and hybrids, were studied at Pushkin and Pavlovsk Laboratories of VIR.
Results. Principal component analysis of the studied plant characters showed that the main differentiating feature for the species was the number of berries per plant, associated with the duration of flowering and fruiting. Some accessions of wild species surpassed cultivars in a number of characteristics. *F. vesca* L. demonstrated the potential for early fruit ripening, prolonged fruiting, and resistance to *Phomopsis* leaf blight, and gray mold; *F. moschata* Duchesne ex Weston and *F. viridis* (Duchesne) Weston were identified for winter hardiness; *F. viridis* and *F. orientalis* Losinsk showed complex resistance to leaf spot and gray mold; *F. mandshurica* Staudt and *F. chiloensis* (L.) Mill. was resistant to gray mold. Wild accessions of *F. moschata* yielded 8.39 to 9.39 t/ha, which placed them in the group with medium yields. This feature, combined with high organoleptic scores, makes their cultivation in Northwest Russia a reality. High-yielding cultivars of *F. × ananassa* (> 15 t/ha) were identified for the northwestern conditions: 'Vladyka Zosima', 'Kupava', 'Yaroslavna', 'Bova', 'Altair', 'Duet', 'Geyzer', 'Forsazh', 'Darenka', 'Torpeda', 'Akvarel', 'Berdsky Rubin', 'Tanyusha', 'Jonsok', and 'Zabelinskaya'.
Conclusion. Wild *Fragaria* spp. showed the potential for expanding the assortment of garden strawberries through distant hybridization or direct introduction into cultivation.

***Keywords*:** strawberry, collection, phenology, yield, organoleptic score, resistance

Acknowledgments: the research was performed within the framework of the state task according to the theme plan of VIR, Project No. FGEM-2022-0004 "Improving the approaches and methods for *ex situ* conservation of the identified genetic diversity of vegetatively propagated crops and their wild relatives, and development of technologies for their effective utilization in plant breeding".

For citation: Kharchenko A.A., Novikova L.Yu. Wild species of *Fragaria* L. as a source of valuable agronomic traits for breeding in Northwest Russia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(1):152-164. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o15

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Земляника ананасная, или садовая (*Fragaria × ananassa* (Weston) Duchesne ex Rozier), признана самой распространенной ягодной культурой в мире (Porter et al., 2023). В силу своей экологической пластичности разнообразные сорта земляники успешно адаптируются к условиям умеренного, средиземноморского и тропического климата, а также к различным системам культивирования. Мировое производство земляники увеличивается с каждым годом: в 2023 г. в мире собрано 10,5 млн т с площадей в 435 тыс. га (https://www.fao.org/faostat/ru/#data/QCL).

В условиях изменения климата перед селекционерами стоит задача по выведению сортов, устойчивых к резким колебаниям температур в зимний период, в том числе способных зимовать при отсутствии снежного покрова, а также засухоустойчивых и жаростойких, поскольку повышение температур будет отрицательно влиять на опыление, развитие и качество плодов (Dale, 2009; Hirabayashi et al., 2022). В умеренном климате вегетационный период удлиняется, что ведет к повторному цветению растений земляники в осенний период. По мере приспособления к изменению климата актуальной задачей является изучение генотипов в изменяющихся условиях (Dale, 2009).

С увеличением выраженности климатической изменчивости экстремальные условия станут слишком значительными для сортов, выращиваемых в однотипных условиях. Поэтому необходимо осуществлять селекцию сортов, адаптированных к нескольким контрастирующим условиям среды (Dale, 2009). Девяносто процентов сортов *F. × ananassa* получены с помощью метода внутривидовой гибридизации (Kharchenko et al., 2024). В то же время отдаленная гибридизация как метод селекции представляет собой перспективный подход к улучшению качеств земляники, поскольку способствует созданию новых генотипов с повышенной устойчивостью к неблагоприятным условиям, что является важным фактором продовольственной безопасности. Дикие виды рода *Fragaria* L. по-прежнему имеют решающее значение для селекционной деятельности, которая теперь может быть интегрирована с новыми геномными и молекулярными знаниями и технологиями (Mezzetti et al., 2018; Kazlouskaya et al., 2021).

Род *Fragaria*, по оценкам разных авторов, включает в себя от 20 до 27 видов (Staudt, 1988; Nathewet et al., 2009; Hummer et al., 2011; Johnson et al., 2014; Kharchenko, Chukhina, 2024) с различным уровнем плоидности от диплоида до декаплоида с базовым числом хромосом x = 7 (Liston et al., 2014). Земляника ананасная является достаточно молодым межвидовым гибридом, полученным в середине XVIII в. в результате спонтанной гибридизации двух американских октоплоидных видов *F. chiloensis* (L.) Mill. и *F. virginiana* (Duchesne) Mill. Длительная селекция методом внутривидовой гибридизации *F. × ananassa* посредством межсортовых скрещиваний и инбридинга способствовала формированию у современных сортов таких хозяйственно ценных признаков, как высокая урожайность, крупноплодность, однородность, транспортабельность, но вместе с тем привела к значительному снижению генетического разнообразия современных сортов, а также к утрате некоторых признаков, до недавнего времени считавшихся несущественными (Lyzhin, Luk'yanchuk, 2021, Kharchenko, Chukhina, 2024).

Генофонд рода, представленный видами с более низкой плоидностью, чем октоплоиды, в настоящее время остается недостаточно исследованным. Существует высокая вероятность наличия у данных видов ценных признаков, таких как высокая адаптивность к широкому спектру мест обитания, устойчивость к болезням и вредителям, аромат (Harbut, Sullivan, 2004; Dávalos-González et al., 2021). Выявление данных характеристик может оказать значительное влияние на решение актуальных задач, стоящих перед селекцией земляники. В качестве примера можно привести обнаружение отдельных форм у *F. vesca* L. и *F. virginiana*, устойчивых к вертициллезному увяданию (возбудитель – гриб *Verticillium dahliae* Kleb.) (Vining et al., 2015). Устойчивость к серой гнили, вызываемой возбудителем *Botrytis cinerea* Pers., обнаружена у *F. chiloensis*, *F. virginiana* и *F. vesca* (González et al., 2009; Bestfleisch et al., 2015). Высокой устойчивостью к белой пятнистости, возбудителем которой является гриб *Ramularia tulasnei* Sacc., обладают виды *F. orientalis* Losinsk., *F. moschata* Duchesne ex Weston, *F. viridis* (Duchesne) Weston (Govorova, Govorov, 2006; Lukyanchuk, Bogdanova, 2010). Отдельные формы *F. viridis* и *F. vesca* имеют устойчивость к бурой пятнистости (возбудитель – гриб *Marssonina potentillae* (Desm.) P. Magn.) (Govorova, Govorov, 2006; Lukyanchuk, Bogdanova, 2010). Устойчивость к угловатой пятнистости, возбудителем которой является гриб *Dendrophoma obscurans* (Ell. et Ev.) Anders., выявлена у *F. moschata*, *F. orientalis*, *F. viridis* (Govorova, Govorov, 2006). Выделены источники высокой зимостойкости у *F. mandshurica* Staudt, *F. orientalis*, *F. viridis* (Zubov, 2004; Kharchenko, Novikova, 2025). *F. viridis* отличается от других представителей рода двумя уникальными характеристиками: неповторимым ароматом и наиболее плотной структурой плодов (Gruner et al., 2017).

Урожайность и качество плодов земляники зависят от сложного взаимодействия между окружающей средой и генотипом (Ather-uz-Zaman et al., 2018). Таким образом, отбор образцов для выращивания и селекции должен основываться на детальном учете климатических условий конкретного региона и оценке потенциала образцов в изменяющихся условиях окружающей среды.

Основными факторами риска для культивирования земляники в Северо-Западном регионе России являются зимние климатические условия, характеризующиеся чередованием морозных периодов и оттепелей, а также высокая вероятность отсутствия снежного покрова в зимнее время.

Цель работы: на основе комплексного изучения представителей рода *Fragaria* из коллекции ВИР выделить источники хозяйственно ценных признаков для использования в селекции, а также возделывания в Северо-Западном регионе России.

Материалы и методы

Изучена выборка из 108 образцов мировой коллекции *Fragaria* Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР), в которую вошли все группы генофонда: сорта, межвидовые гибриды, образцы диких видов, потенциальные возможности которых требовалось оценить относительно имеющегося набора культивируемых сортов для дальнейшей предселекционной работы. Коллекцию для изучения заложили осенью 2021 г. на научно-производственной базе (НПБ) «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР», расположенной в 30 км к югу от Санкт-Петербурга. Выса-

живали по 30 растений на образец. Схема посадки – 0,4 × 0,8 м, или 41 тыс. растений/га; применен способ укрытия насаждений агроволокном плотностью 120 г/м^2 с использованием капельного орошения. Наблюдения проведены в 2022–2025 гг.

В состав выборки вошли: 55 сортов земляники (53 образца *F. × ananassa*, 1 – *F. moschata*, 1 – *F. × ananassa × F. moschata*), 39 образцов диких видов (7 – *F. orientalis*, 10 – *F. vesca*, 8 – *F. viridis*, 3 – *F. chiloensis*, 2 – *F. moschata*, 7 – *F. mandshurica*, 1 – *F. moupinensis* Grad., 1 – *F. virginiana*), 12 межвидовых гибридов (как с *F. × ananassa*, так и диких видов между собой), 2 гибрида *F. × ananassa*.

Выборка 108 образцов состоит из 59 образцов из Азии, 43 – из Европы (29 – из европейской части России, 14 – из зарубежной Европы), 6 – из Америки.

Полевые исследования проведены по общепринятой методике (Sedov, Ogoltsova, 1999). Фенологические наблюдения, анализ повреждений растений земляники болезнями и вредителями проводили в 2022–2024 гг. Дегустационную оценку ягод и учет урожая проводили со второго года после посадки, в 2023 и 2024 г. Изучение зимостойкости проводились в 2022–2025 гг. Состояние растений весной и осенью, сила цветения весной и осенью, сила плодоношения, дегустационные качества ягод оценивались в баллах: 0 – низший, 5 – высший. Зимостойкость и поражение болезнями также оценивали по пятибалльной шкале: 0 – нет поражения, 5 – полное поражение. В два года (2023 и 2024) эксперимента нами было замечено массовое зацветание растений осенью. Начало цветения осенью было добавлено к регистрируемым признакам. Потенциальную урожайность рассчитывали путем подсчета цветоносов, цветков и завязавшихся ягод в период между концом цветения и началом созревания ягод. Фактическую продуктивность определяли во время полного созревания ягод путем взвешивания.

Использованы дисперсионный анализ с критерием Тьюки, корреляционный анализ и метод главных компонент в пакете Statistica 13.3. Показатели зимостойкости, устойчивости к болезням и вредителям, осеннее зацветание исследовали с помощью непараметрических методов – корреляций по Спирмену, сравнение видов – критерием Краскела – Уоллиса. В исследовании принят уровень значимости 5%.

Погодные условия эксперимента

Погодные условия в годы эксперимента благоприятствовали вегетации земляники (рис. 1). Значительного выпадения образцов не наблюдалось. Дифференцирующие условия перезимовки были зимой 2024/2025 г. из-за теплой зимы и большого количества дней без снежного покрова в начале и конце зимы.

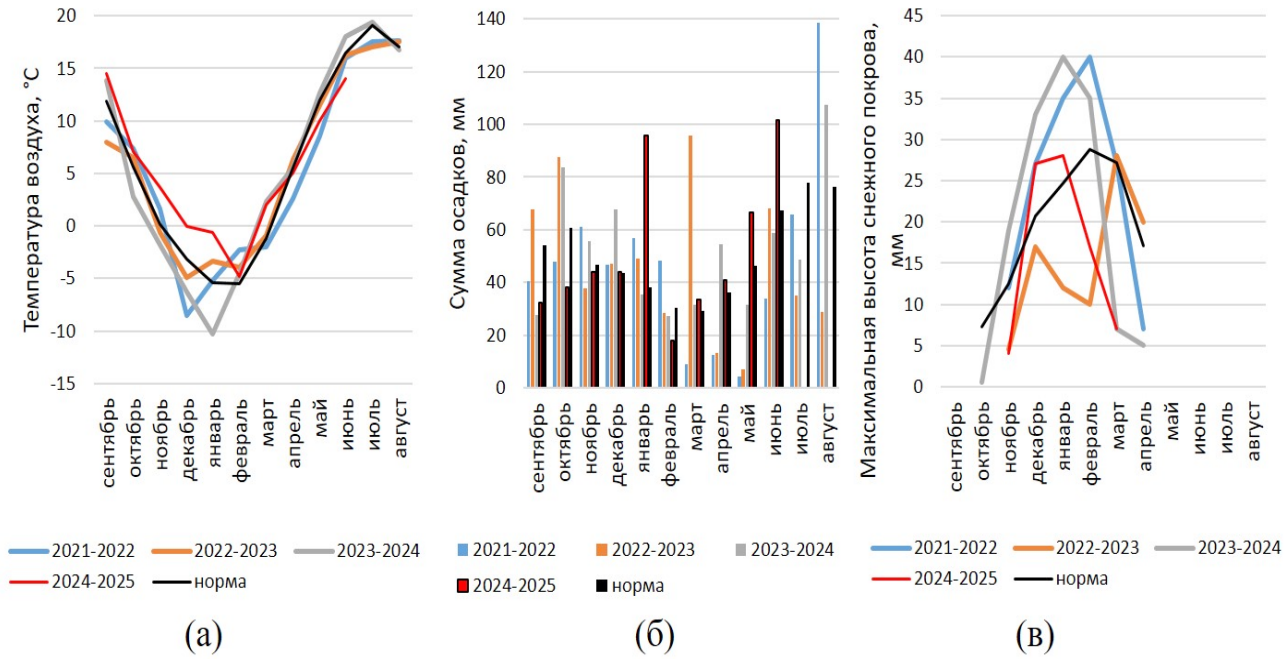


Рис. 1. Погодные условия перезимовки и вегетации *Fragaria* L., НПБ «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР»: а) средняя температура воздуха; **б)** сумма осадков; **в)** максимальная высота снежного покрова. Норма – среднее за 1991–2020 гг.

Fig. 1. Weather conditions during the overwintering periods and growing seasons of *Fragaria* L. at Pushkin and Pavlovsk Laboratories of VIR: a) mean air temperature; **б)** precipitation; **в)** maximum snow cover depth. The norm is the average for 1991–2020

Результаты и обсуждение

Фенологические, потребительские показатели и урожайность образцов

Двухфакторный дисперсионный анализ (год, генотип) показал, что вариабельность большинства изученных признаков главным образом зависела от генотипа Год эксперимента также оказал влияние на все фенотипические признаки образцов коллекции земляники, кроме общего состояния растений осенью. Наиболее чувствительной к условиям года оказалась фенология. Даты цветения более чем на 50% определялась условиями года (67,1% – начало цветения, 67,0% – массовое цветение). Известно, что весенние фенодаты наиболее зависимы от погоды. Даты начала и массового плодоношения

чуть больше зависели от года, чем от генотипа. Для *F. × ananassa* показано, что межгодовая вариабельность дат начала и конца цветения, конца созревания более чем на 50% определяется температурами мая и июня (Kharchenko et al., 2022).

Анализ структуры фенологических признаков, потребительских качеств ягод и урожайности проводили методом главных компонент по 17 признакам, для получения невырожденной матрицы и устойчивого решения были исключены признаки «дата конца цветения» и «дата конца плодоношения». По критерию Кайзера выделяются 4 фактора, объясняющие 77,1% общей дисперсии (табл. 1).

Третий фактор (17,5%) – общее состояние растений весной и положительно связанная с ним дата начала плодоношения. Ранним началом плодоношения характеризуются виды *F. vesca*, *F. virginiana*, *F. mandshurica*; поздним – межвидовые гибриды, *F. viridis*, *F. moschata*, *F. moupinensis*.

Четвертый фактор (8,5%) – дегустационная оценка. Низкой дегустационной оценкой выделяется вид *F. chiloensis*, выше среднего – *F. viridis*, *F. mandshurica*, *F. orientalis*, *F. moschata*.

Таким образом, виды *F × ananassa*, *F. vesca*, *F. moschata* образовали компактные группы в пространстве первых двух факторов (см. рис. 2). По числу элементов продуктивности, состоянию после перезимовки и раннему нача-

Таблица 1. Факторные нагрузки главных компонент

Table 1. Factor loadings of the principal components

Признак	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
Общее состояние растений весной	0,16	0,15	–0,73	–0,03
Дата начала цветения	–0,44	0,39	–0,56	–0,37
Дата массового цветения	–0,45	0,31	–0,57	–0,33
Продолжительность цветения	0,62	–0,55	0,27	–0,29
Сила цветения	0,65	0,16	–0,20	0,46
Дата начала плодоношения	–0,48	–0,39	–0,66	0,03
Дата массового плодоношения	–0,43	–0,37	–-0,62	0,01
Продолжительность плодоношения	0,72	–0,08	0,19	–0,48
Сила плодоношения	0,72	0,32	–0,11	0,38
Общее состояние растений осенью	0,18	–0,27	–0,62	0,23
Количество цветоносов на куст	0,81	–0,02	–0,35	–0,21
Количество цветков на куст	0,79	–0,19	–0,38	–0,24
Количество ягод на куст	0,86	–0,14	–0,25	–0,21
Урожайность с куста	0,35	0,86	–0,12	0,00
Средняя масса ягоды	–0,02	0,95	0,07	–0,05
Максимальная масса ягоды	0,11	0,95	–0,02	–0,02
Дегустационная оценка	0,30	–0,13	–0,28	0,57
Собственное значение	4,96	3,69	2,97	1,44
Процент дисперсии	0,292	0,217	0,175	0,085

Первый фактор, дифференцирующий выборку (объясняет 29,2% дисперсии), – число элементов продуктивности: количество ягод, цветков, цветоносов на куст, связанные положительно с продолжительностью и силой плодоношения. По фактору 1 (рис. 2) контрастны между собой дикие виды.

Наибольшее количество элементов продуктивности отмечали у *F. vesca*, *F. moupinensis*, *F. moschata*, *F. mandshurica*, наименьшее – у *F. chiloensis*, *F. orientalis*, *F. viridis*. Изменчивость диких видов значительно превосходит *F. × ananassa*.

Второй фактор (21,7%) – масса ягоды и связанная с ней урожайность. По фактору 2 контрастны образцы с крупной ягодой (сорта *F. × ananassa*, *F. moschata*, *F. moupinensis*) и с мелкой (дикие виды и межвидовые гибриды).

лу плодоношения некоторые образцы диких видов превосходят культурные сорта, а по массе ягоды и дегустационной оценке сравнимы с ними.

***Фенологические, потребительские признаки качества ягод и урожайность видов рода Fragaria* L.**

В дисперсионный анализ вошли виды, представленные более чем двумя образцами, то есть были исключены *F. moupinensis* и *F. virginiana*, а также сорт земклуники ‘Купчиха’ (*F. ananassa* × *F. moschata*). Достоверные различия наблюдались по всем морфологическим показателям ($p < 0,022$), кроме даты начала цветения и состояния растений осенью (табл. 2, рис. 3).

Наименьший средний балл оценки **общего состояния растений весной** был у вида *F. mandshurica* (3,7 балла), достоверно ниже, чем у всех остальных видов.

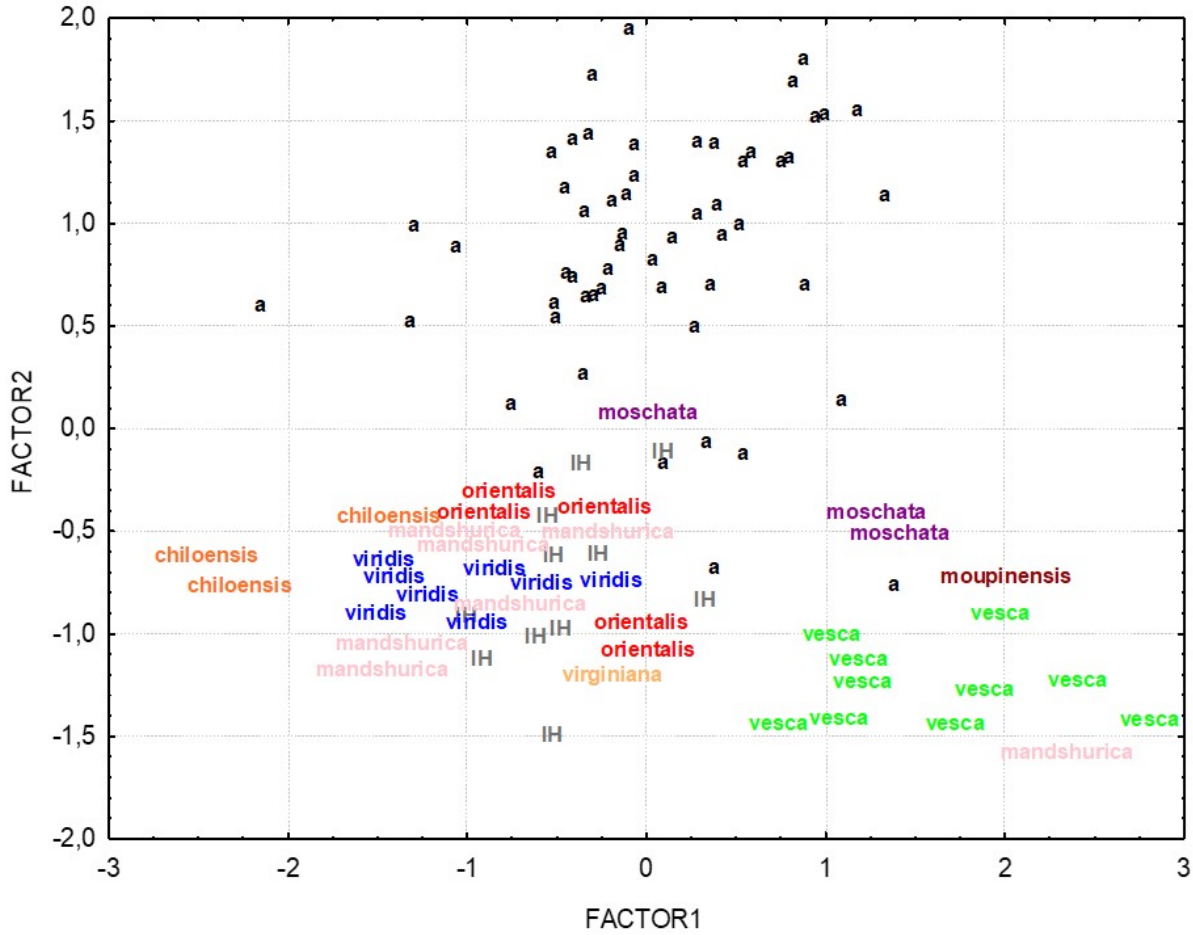


Рис. 2. Группировка 108 образцов *Fragaria* L. в пространстве первых факторов. Обозначения образцов: цветом выделены дикие виды; а – *F. × ananassa*; IH – межвидовые гибриды

Fig. 2. Grouping of 108 *Fragaria L.* accessions in the space of the first factors. Designations of accessions: wild species are highlighted in color; a – *F. × ananassa*; IH – interspecies hybrids

Остальные виды друг от друга не отличались и имели балл 4,3–5,0.

Дата начала цветения у видов не различалась, наступала в среднем 21 – 25 мая. Самая ранняя дата массового цветения наблюдалась у *F. vesca* (25 мая), достоверно раньше, чем у наиболее позднего вида *F. moschata* (31 мая). Ранний конец цветения был у *F. viridis* (16 июня), поздний – у *F. vesca* (16 июля), у остальных – 18 – 22 июня. Продолжительность цветения была наименьшей у *F. viridis* (22 сут.), наибольшей – у *F. vesca* (56,9 сут.), у остальных видов – 25 – 31 сут. Сила цветения была наименьшей у *F. chiloensis* (1,8 балла), *F. mandshurica* (3,3 балла), наибольшей – у *F. × ananassa*, межвидовых гибридов, *F. moschata* (4,1–4,6 балла).

По **дате начала плодоношения** можно выделить две контрастные группы: первая – *F. vesca*, *F. × ananassa* (18 – 20 июня) и вторая – межвидовые гибриды и *F. viridis* (30 июня). Дата массового плодоношения наиболее ранняя также у *F. vesca* (23 июня), поздняя – у межвидовых гибридов, *F. chiloensis* и *F. viridis* (3 – 5 июля). Конец плодоношения наиболее ранний у *F. mandshurica* (8 июля), наиболее поздний – у *F. moschata* и *F. vesca* (20 – 25 июля). Продолжительность плодоношения наименьшая у *F. viridis* (13,3 сут.), наибольшая – у *F. vesca* (36,4 сут.). По силе плодоношения выделяется *F. chiloensis* (1,3 балла), достоверно ниже остальных (3,3 – 4,9 балла). Таким образом, *F. vesca* может служить источником раннего и продолжительного плодоношения.

По **состоянию растений осенью** различий нет, все виды получили оценки в диапазоне 4,4–5,0 балла.

Наибольшим количеством **цветоносов** на куст выделились виды *F. vesca* и *F. moschata* (16,5–18,9 шт.), наименьшим – *F. chiloensis* и *F. viridis* (4,2–6,8 шт.). Количество цветков следовало той же закономерности: наибольшее – у *F. vesca* и *F. moschata* (123,4–149,3 шт.), наименьшее – у *F. chiloensis*, *F. viridis* (29,0–38,1 шт.). Количество ягод ожидаемо было наибольшим у *F. moschata* и *F. vesca* (136,1–151,3 шт.) – достоверно выше, чем у *F. chiloensis* (16 шт.). Таким образом, виды *F. vesca* и *F. moschata* могут служить источниками многочисленного образования ягод на кусте – составной частью потенциальной урожайности.

Фактическая урожайность ожидаемо больше у сортов *F. × ananassa*, в среднем 309,7 г/куст (127,4 ц/га). Второй по урожайности вид – *F. moschata*, 179,9 г/куст (74,0 ц/га). Дикие образцы *F. moschata* показали фактическую урожайность 83,9 и 93,9 ц/га. У диких видов и межвидовых гибридов урожай с куста составил 30,6–79,0 г/куст (12,6–32,5 ц/га). **Потенциальная урожайность** *F. × ananassa* составляет 441,7 г/куст, *F. moschata* – 239,6 г/куст, у остальных видов – 31,7–87,1 г/куст, что соответствует 79,3–97,4% реализации потенциала урожайности. Наиболее высокий процент реализованной потенциальной урожайности выявлен у *F. mandshurica* (97,4%).

По **средней массе ягоды** лидирует *F. × ananassa* (6,5 г). На втором месте *F. chiloensis* (3,5 г), но его отличия от дру-

Таблица 2. **Фенологические, потребительские признаки и урожайность видов рода *Fragaria* L.**
Table 2. **Phenological and consumer-oriented characteristics of *Fragaria* L. spp. and their yield**

Признак	*F. ananassa*	Межвидовые гибриды	*F. chiloensis*	*F. mandshurica*	*F. moschata*	*F. orientalis*	*F. vesca*	*F. viridis*
Число образцов	55	12	3	7	3	7	10	8
Общее состояние растений весной, балл	4,4 ± 0,1^{b}	4,8 ± 0^{b}	4,5 ± 0,2^{b}	3,7 ± 0,1^{a}	5,0 ± 0,0^{b}	4,3 ± 0,1^{b}	4,3 ± 0,1^{b}	4,7 ± 0,1^{b}
Дата начала цветения	24,05 ± 0,4^{a}	24,05 ± 0,6^{a}	25,05 ± 1,1^{a}	21,05 ± 0,7^{a}	25,05 ± 1^{a}	23,05 ± 1,4^{a}	21,05 ± 0,6^{a}	25,05 ± 0,3^{a}
Дата массового цветения	29,05 ± 0,5^{ab}	29,05 ± 0,5^{ab}	30,05 ± 1,4^{ab}	27,05 ± 0,7^{ab}	31,05 ± 0,5^{b}	29,05 ± 1,4^{ab}	25,05 ± 0,5^{a}	29,05 ± 0,4^{ab}
Дата конца цветения	18,06 ± 0,4^{ab}	19,06 ± 0,7^{ab}	21,06 ± 2,2^{ab}	22,06 ± 3,3^{ab}	22,06 ± 1,9^{ab}	18,06 ± 1^{ab}	16,07 ± 0,5^{c}	16,06 ± 0,8^{a}
Продолжительность цветения, сут.	24,6 ± 0,4^{a}	26,7 ± 0,8^{ab}	27,4 ± 1,3^{ab}	31,4 ± 3,9^{b}	28 ± 2,9^{ab}	26,5 ± 1^{ab}	56,9 ± 0,8^{c}	22 ± 0,8^{a}
Сила цветения, балл	4,1 ± 0,1^{c}	4,2 ± 0,2^{c}	1,8 ± 0,5^{a}	3,3 ± 0,3^{b}	4,6 ± 0,1^{c}	4,1 ± 0,2^{bc}	4,1 ± 0,1^{bc}	3,5 ± 0,2^{bc}
Дата начала плодоношения	20,06 ± 0,4^{a}	30,06 ± 1,5^{c}	29,06 ± 0,1^{bc}	22,06 ± 1,6^{ab}	27,06 ± 1,2^{abc}	24,06 ± 1,5^{abc}	18,06 ± 1,3^{a}	30,06 ± 0,3^{c}
Дата массового плодоношение	25,06 ± 0,7^{ab}	03,07 ± 1,4^{cd}	05,07 ± 0,3^{cd}	26,06 ± 1,5^{abc}	30,06 ± 0,9^{abcd}	28,06 ± 1,1^{abcd}	23,06 ± 0,4^{a}	05,07 ± 0,3^{d}
Дата конца плодоношения	10,07 ± 0,6^{ab}	15,07 ± 1,3^{ab}	16,07 ± 1,2^{abc}	08,07 ± 2,7^{a}	20,07 ± 2,2^{bc}	10,07 ± 0,9^{ab}	25,07 ± 0,7^{c}	14,07 ± 0,5^{ab}
Продолжительность плодоношения, сут.	19,8 ± 0,5^{b}	15,6 ± 1^{ab}	16,8 ± 1,3^{ab}	15,9 ± 2,7^{ab}	23,4 ± 1,1^{b}	16,1 ± 1,7^{ab}	36,4 ± 1,8^{c}	13,3 ± 0,3^{a}
Сила плодоношения, балл	4,1 ± 0,1b	3,3 ± 0,3^{b}	1,3 ± 0,7^{a}	3,3 ± 0,4^{b}	4,9 ± 0,1^{b}	4 ± 0,2^{b}	4,2 ± 0,2^{b}	3,4 ± 0,1^{b}
Общее состояние растений осенью, балл	4,5 ± 0,1^{a}	4,9 ± 0,1^{a}	4,4 ± 0,1^{a}	4,6 ± 0,1^{a}	4,7 ± 0,3^{a}	4,7 ± 0,1^{a}	4,7 ± 0,1^{a}	5,0 ± 0^{a}
Количество цветоносов на куст, шт.	10,9 ± 0,7^{abcd}	11,6 ± 0,9 ^{abcd}	4,2 ± 0,3^{a}	9,6 ± 3,3^{abcd}	18,9 ± 3,7^{cd}	9,9 ± 3,4 ^{abcd}	16,5 ± 1,9^{bcd}	6,8 ± 1,3^{ab}
Количество цветков на куст, шт.	63,9 ± 3,5^{ab}	86,9 ± 7^{abc}	29,0 ± 3,0^{a}	51,9 ± 20,5^{a}	149,3 ± 32,8^{c}	70,7 ± 25,8^{abc}	123,4 ± 16^{c}	38,1 ± 7,7^{a}
Количество ягод на куст, шт.	70,2 ± 3,9^{ab}	57,3 ± 9^{ab}	16,7 ± 8,3^{a}	52,3 ± 24,1^{ab}	136,1 ± 34,8^{bc}	56,3 ± 6,9^{ab}	151,3 ± 18,6^{c}	43,7 ± 11,2^{ab}
Урожайность, г/куст	309,7 ± 18,7^{b}	73,4 ± 15,1^{a}	46,1 ± 18,2^{a}	30,6 ± 8,4^{a}	179,9 ± 36,9^{ab}	45,7 ± 7,1^{a}	79 ± 12,8^{a}	42,1 ± 10,2^{a}
Урожайность, ц/га	127,4 ± 7,7^{b}	30,2 ± 6,2^{a}	19,0 ± 7,5^{a}	12,6 ± 3,4^{a}	74 ± 15,2^{ab}	18,8 ± 2,9^{a}	32,5 ± 5,3^{a}	17,3 ± 4,2^{a}
Потенциальная урожайность, г/куст	441,7 ± 29,1^{b}	79,5 ± 15,5^{a}	58,8 ± 29,3^{a}	31,7 ± 8,7^{a}	239,6 ± 41,8^{ab}	47,3 ± 7,8^{a}	87,1 ± 14,8^{a}	50,3 ± 15,9^{a}
Отношение фактической урожайности к потенциальной, %	79,3 ± 2,1^{a}	91,6 ± 2,3^{ab}	86,3 ± 8,1^{ab}	97,4 ± 1,2^{b}	74,1 ± 4,9^{ab}	97,1 ± 1,1^{ab}	92,1 ± 1,5^{ab}	91,6 ± 3,7^{ab}
Средняя масса ягоды по всем сборам, г	6,5 ± 0,3^{b}	1,3 ± 0,1^{a}	3,5 ± 0,1^{ab}	0,8 ± 0,1^{a}	1,9 ± 0,3^{a}	0,9 ± 0^{a}	0,5 ± 0^{a}	1,1 ± 0,0^{a}
Максимальная масса ягоды, г	21,5 ± 1,2^{b}	2,2 ± 0,3^{a}	3,6 ± 0,2^{ab}	1,1 ± 0,1^{a}	6,9 ± 0,3^{a}	1,5 ± 0,2^{a}	1 ± 0,1^{a}	2 ± 0,1^{a}
Дегустационная оценка, балл	4,1 ± 0,0^{b}	4,2 ± 0,1^{b}	3,3 ± 0,1^{a}	4,4 ± 0,0^{b}	4,6 ± 0,1^{b}	4,3 ± 0,1^{b}	4,2 ± 0,1^{b}	4,3 ± 0,0^{b}

Примечание: одинаковыми буквами отмечены значения, достоверно не различающиеся на 5-процентном уровне значимости
Note: values that do not significantly differ at the 5% significance level are marked with the same letters

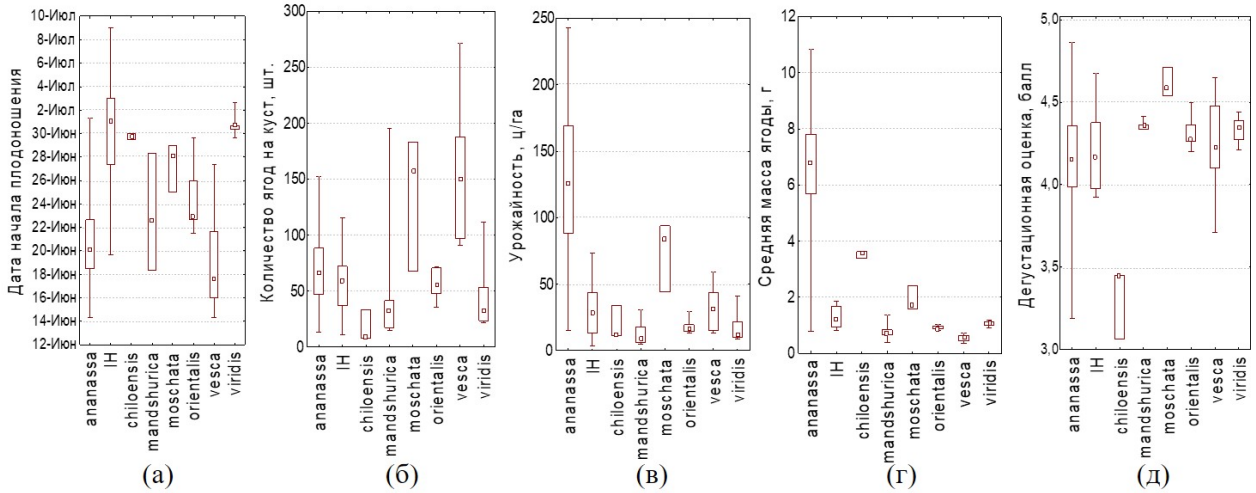


Рис. 3. Основные фенологические, потребительские признаки и урожайность видов рода *Fragaria* L.:
а) дата начала плодоношения; **б)** количество ягод на куст; **в)** урожайность; **г)** средняя масса ягоды;
д) дегустационная оценка

Fig. 3. Major phonological and consumer-oriented characteristics of *Fragaria* L. spp. and their yield:
a) dates of the onset of ripening; **б)** number of berries per bush; **в)** yield; **г)** average berry weight; **д)** organoleptic score

гих видов недостоверны. Межвидовые гибриды и остальные виды характеризовались мелкоплодностью, масса ягоды составила 0,5–1,9 г. Наибольшая максимальная масса (средняя для вида) – у *F. × ananassa* (21,5 г) и *F. moschata* (6,9 г). У остальных видов – 1,0–2,0 г, у *F. chiloensis* – 3,6 г.

Дегустационная оценка достоверно ниже у *F. chiloensis* (3,3 балла). У остальных видов она достоверно не различалась и составила 4,1–4,6 балла. Стоит отметить, что среди видов наивысшая оценка (4,6 балла) отмечена у *F. moschata*.

Зимостойкость

Условия зимы оказали значимое влияние на состояние растений после перезимовки и оценку степени отрастания ($p = 0,000$), не оказали – на степень перезимовки листьев ($p = 0,267$). В 2024 г. после холодной зимы растения оказались в худшем состоянии, чем в 2022 и 2023 г., а теплая зима 2024/2025 г. с нестабильным снежным покровом привела к самому значительному повреждению образцов за годы исследования. Виды различались по всем трем показателям зимостойкости ($p < 0,001$).

Критерии зимостойкости были разработаны для *F. × ananassa*, зимующего в вегетирующем состоянии. Многие экотипы диких видов в норме зимуют с побуревшими листьями, поэтому оценка состояния после перезимовки по побурению листьев не является объективным показателем способности к продолжению вегетации, в частности это относится к *F. mandshurica* и *F. viridis* (Kharchenko, Novikova, 2025). Только оценка по отрастанию растений весной дает объективную оценку успешности перезимовки для всех видов *Fragaria*.

По критерию отрастания растений весной наибольшую зимостойкость в нестабильных зимних условиях Северо-Запада проявили *F. moschata* и *F. viridis* (рис. 4).

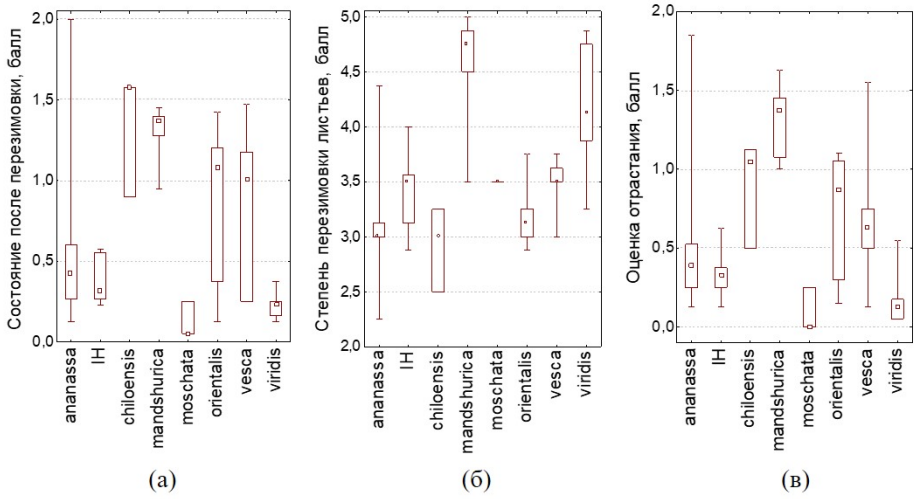


Рис. 4. Показатели зимостойкости видов *Fragaria* L., балл повреждения:
а) состояние после перезимовки; **б)** степень перезимовки листьев; **в)** оценка отрастания

Fig. 4. Winter hardiness indicators of *Fragaria* L. spp., damage score:
a) condition after overwintering; **б)** degree of overwintering for leaves; **в)** regrowth assessment

Наибольшим баллом повреждения после перезимовки (см. рис. 4) выделялись *F. orientalis*, *F. chiloensis*, *F. mandshurica*; наибольшим побурением листьев выделялись виды *F. mandshurica* и *F. viridis*; наихудшим отрастанием выделялся вид *F. mandshurica*. Причина высокого балла повреждения зимостойкого вида *F. mandshurica* – оттепели конца зимы 2024/2025 г., что подтверждает наши выводы по определению зимостойкости земляники в контролируемых условиях, в которых данный вид способен выдерживать низкие температуры в начале и середине зимы, но к заморозкам после оттепелей в конце зимы менее устойчив (Kharchenko, Novikova, 2025).

Поражение болезнями и вредителями

Поражение болезнями и вредителями (кроме вертициллеза) за три года исследования было максимальным после зимы 2023/2024 г. Поражение серой гнилью, бурой, белой, угловатой пятнистостью, вертициллезом зависело от условий года ($p = 0,000$), а редко наблюдавшееся поражение земляничным клещом не зависело от года ($p = 0,562$). Критерий Краскела – Уоллиса показал достоверность различий устойчивости видов ко всем изученным болезням ($p < 0,001$), кроме поражения земляничным клещом ($p = 0,365$) и вертициллезом ($p = 0,420$).

Серая гниль. Наибольшую поражаемость (рис. 5) показал вид *F. × ananassa* (средняя доля поврежденных плодов составила 3,0% за трехлетний период, причем у образца к-49741 'White Swedish' уровень поражения достиг рекордных 70% в 2024 г.), а также *F. moschata* (до 12%). Межвидовые гибриды показали до 3% поражения. Дикие виды (*F. chiloensis*, *F. mandshurica*, *F. orientalis*, *F. vesca*, *F. viridis*) не поражались серой гнилью и могут быть использованы как источники устойчивости.

Бурая пятнистость. Наибольшей устойчивостью к бурой пятнистости выделяется *F. orientalis* (до 0,2 балла), имеющий балл поражения достоверно ниже, чем *F. × ananassa* (максимальный балл поражения – 3), *F. moschata* (до 2 баллов), *F. chiloensis* (до 2 баллов), межвидовые гибриды (до 2 баллов).

Белая пятнистость. Наименьший балл отмечен у *F. viridis* (до 0,1 балла), достоверно ниже *F. chiloensis* (до 2 баллов) и *F. vesca* (до 2 баллов).

Угловатая пятнистость практически не поразила *F. vesca* (максимальный балл за годы исследования – 0,7), что достоверно ниже *F. × ananassa* (до 3 баллов), *F. moschata* (до 3 баллов) и межвидовых гибридов (до 3 баллов).

Вертициллезом оказались поражены 16 образцов в 2022 г. и 2 из них еще и в 2023 г.: 12 образцов *F. × ananassa*, 1 межвидовой гибрид, 2 образца *F. orientalis*, один – *F. vesca*. Максимальный балл (3) отмечен у сорта 'Бердская Ранняя' (*F. × ananassa*, к-49709) в 2022 г.

Земляничным клещом в 2023 г. были поражены 6 образцов *F. × ananassa*, а также сорт земклуники 'Купчиха', в 2024 г. – лишь два образца. Максимальное поражение составило 4 балла у гибрида *F. × ananassa* 17/9-15-1 (к-16930) в оба года).

Осеннее цветение

В 2023 и 2024 г. из-за длинных теплых осенних месяцев наблюдалось повторное цветение и плодоношение ряда образцов осенью: в 2023 г. в период 1 – 20 сентября зацвели 38 образцов, в 2024 – с 25 августа до 23 октября – 50 образцов (табл. 3).

Осеннее цветение приобретает особую значимость в условиях изменения климата, поскольку оно может снижать число элементов продуктивности следующего года. Это может проявляться независимо от исхода цветения – будь то повреждение морозами зимой или преждевременное плодообразование вне оптимального периода.

Выделение источников хозяйственно ценных признаков

По результатам трехлетнего полевого опыта из 108 образцов представителей рода *Fragaria* различного эколого-географического происхождения в соответствии

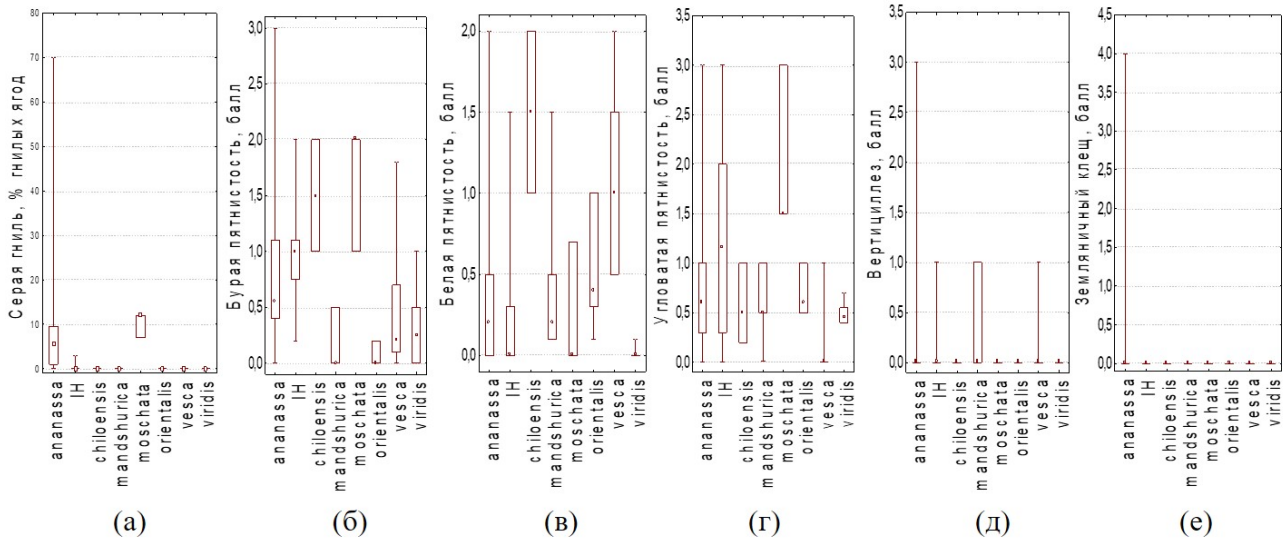


Рис. 5. Поражение болезнями и вредителями видов *Fragaria* L.:
а) серая гниль; **б)** бурая пятнистость; **в)** белая пятнистость; **г)** угловая пятнистость; **д)** вертициллез; **е)** земляничный клещ

Fig. 5. Disease and pest damage of *Fragaria* L. spp.:
а) gray mold; **б)** leaf scorch; **в)** leaf spot; **г)** *Phomopsis* leaf blight; **д)** *Verticillium* wilt; **е)** strawberry mite

Таблица 3. Количество образцов исследованных видов, зацветших осенью в 2023 и 2024 г.
Table 3. Number of accessions of the studied species that bloomed in the autumn seasons of 2023 and 2024

Вид	Всего образцов, шт.	Число зацветших образцов			
		2023		2024	
		шт.	%	шт.	%
F. × ananassa	55	10	18,2	18	32,7
Земклуника 'Купчиха'	1	1	100,0	1	100,0
Межвидовые гибриды	12	2	16,7	2	16,7
F. chiloensis	3	0	0,0	0	0,0
F. mandshurica	7	7	100,0	7	100,0
F. moschata	3	1	33,3	2	66,7
F. moupinensis	1	0	0,0	1	100,0
F. orientalis	7	4	57,1	5	71,4
F. vesca	10	6	60,0	8	80,0
F. viridis	1	0	0,0	0	0,0
F. virginiana	8	8	100,0	7	87,5
ИТОГО	108	39	36,1	51	47,2

с методическими указаниями (Sedov, Ogoltsova, 1999) выделены образцы – источники основных хозяйственно ценных признаков. Образцы с ранним и поздним сроком созревания выделены как контрастные группы по началу плодоношения по критерию НСР: ранние – начало созревания до 18 июня, поздние – после 29 июня.

1. Ранний срок созревания ягод: 'Берсеневская' (к-49702), 'Дуэт' (к-49687), 'Сахалинская Ремонтантная' (к-13680), 'Бирюлевская Ранняя' (к-14194), 'Macherauchs Marieva' (к-21410); *F. vesca* (к-49731, к-16924А, к-49732, к-49733, к-16952А); гибриды *F. × ananassa* 17/9-15-1 (к-16930А) и *F. × ananassa* № 62 (к-16931А).

2. Поздний срок созревания ягод: 'Mieze Schindler' (к-49738), *F. viridis* (к-38142, к-49734, к-49735, к-17725, к-16948А, к-16944А, к-16925А); *F. chiloensis* (к-14925); межвидовые гибриды (к-38153, к-38152, к-38151, к-38154, к-14927, к-38148, к-38145).

3. Высокоурожайные сорта (выше 150 ц/га): 'Владыка Зосима' (к-49703), 'Купава' (к-49698), 'Ярославна' (к-49694), 'Бова' (к-49689), 'Альтаир' (к-49690), 'Дуэт' (к-49687), 'Гейзер' (к-49688), 'Форсаж' (к-49692), 'Даренка' (к-49686), 'Торпеда' (к-49696), 'Акварель' (к-49695), 'Бердский Рубин' (к-49712), 'Танюша' (к-49708), 'Jonsok' (к-49739), 'Забелинская' (к-49718).

4. Высокие вкусовые качества плодов (дегустационная оценка – 4,5–5,0 баллов): сорта 'Кандалакшинская' (к-16917А), 'Di Milano' (к-7541), 'Даренка' (к-49686), 'Купчиха' (к-49737), 'Mieze Schindler' (к-49738), 'Италмасс' (к-49693), 'Polka' (к-49714); *F. orientalis* (к-49725); *F. moschata* (к-49729, к-49730); *F. moupinensis* (к- 7547); *F. vesca* (к-16924А); межвидовые гибриды (к-38152, к-38149).

5. Устойчивость к бурой пятнистости (поражения не более чем на 1 балл): сорта 'Классика' (к-49697), 'Купава' (к-49698), 'Форсаж' (к-49692), 'Даренка' (к-49686), 'Торпеда' (к-49696), 'Di Milano' (к-7541), 'Полярная' (к-49736), 'Mieze Schindler' (к-49738), 'Tago' (к-49713); межвидовые гибриды (к-38156, к-14927, к-38146, к-38148, к-38155, к-38149); *F. vesca* (к-16943А); *F. chiloensis* (к-14926); *F. mandshurica* (к-49719).

6. Устойчивость к белой пятнистости (поражения не более чем на 1 балл): сорта 'Берсеневская' (к-49702), 'Классика' (к-49697), 'Купава' (к-49698), 'Форсаж' (к-49692), 'Даренка' (к-49686), 'Алтын' (к- 49691), 'Торпеда' (к-49696), 'Protem' (к-21408), 'Алая' (к-30679), 'Di Milano' (к-7541), 'Купчиха' (к-49737), 'Итурупская' (к-29987), 'Сахалинская Ремонтантная' (к-13680), 'Dukat' (к-49740), 'White Swedish' (к-49741), 'Polka' (к-49714), 'Пелагея' (к-49919), 'Daroyal' (к-49752), 'Tago' (к-49713); межвидовые гибриды (к-38156, к-38145, к-38152, к-14927, к-38146, к-38148, к-38151, к-38149); *F. chiloensis* (к-14925); *F. moschata* (к-49729, к-49730); *F. moupinensis* (к-7547); гибрид *F. × ananassa* № 62 (к-16931А).

7. Устойчивость к угловатой пятнистости (поражения не более чем на 1 балл): 'Алтын' (к-49691), 'Алая' (к-30679), 'Полярная' (к-49736), 'Итурупская' (к-29987), 'Сахалинская ремонтантная' (к-13680), 'Mieze Schindler' (к-49738), 'Dukat' (к-49740), 'Polka' (к-49714), 'Пелагея' (к-49919), межвидовые гибриды (к-38152, к-38155, к-38151); *F. vesca* (к-16924А, к-16972А, к-16943А); *F. chiloensis* (к-14925, к-15119, к-14926; *F. mandshurica* (к-49719); гибрид *F. × ananassa* № 62 (к-16931А).

8. Устойчивость к серой гнили (не более 10% пораженных плодов в годы, благоприятные для развития болезни, и не более 5% в обычные годы): сорта 'Покровская' (к-49700), 'Александра' (к-49701), 'Берсеневская' (к-49702), 'Владыка Зосима' (к-49703), 'Ярославна' (к-49694), 'Альтаир' (к-49690), 'Даренка' (к-49686), 'Алтын' (к-49691), 'Торпеда' (к-49696), 'Акварель' (к-49695), 'Бердский Рубин' (к-49712), 'Карусель' (к-49710), 'Полярная' (к-49736), 'Mieze Schindler' (к-49738), 'Jonsok' (к-

49739), ‘Казахстанская’ (к-10291), ‘Dukat’ (к-49740), ‘Узбекистанская’ (к-12343), ‘Солнечная Поляна’ (к-49716), ‘Италмас’ (к-49693), ‘Polka’ (к-49714), ‘Пелагея’ (к-49919), ‘Tago’ (к-49713), ‘Alba’ (к-45456), ‘Asia’ (к-45455), ‘Daroyal’ (к-49752); межвидовые гибриды (к-38156, к-38147, к-38145, к-38152, к-38153, к-14927, к-38146, к-38148, к-38155, к-38151, к-38154, к-38149); все экотипы *F. mandshurica* (к-49727, к-49728, к-49722, к-49719, к-49705, к-49726, к-49724); все экотипы *F. orientalis* (к-49706, к-49720, к-49725, к-16929А, к-16926А, к-16927А, к-16928А); *F. vesca* (к-49721, к-49723, к-49731, к-16924А, к-16972А, к-49732, к-49733, к-16918А, к-16952А, к-16943А); *F. viridis* (к-16925А, к-49754, к-38142, к-49734, к-49735, к-17725, к-16948А, к-16944А); *F. chiloensis* (к-14925, к-15119, к-14926); *F. virginiana* (к-14393); гибриды *F. × ananassa* № 62 (к-16931А) и 17/9-15-1 (к-16930А).

9. Комплексная устойчивость к бурой, белой, угловатой пятнистостям листьев (поражения не более чем на 1 балл): сорта ‘Покровская’ (к-49700), ‘Александра’ (к-49701), ‘Владыка Зосима’ (к-49703), ‘Садово-Спасская’ (к-49704), ‘Славяночка’ (к-49699), ‘Ярославна’ (к-49694), ‘Бова’ (к-49689), ‘Альтаир’ (к-49690), ‘Дуэт’ (к-49687), ‘Гейзер’ (к-49688), ‘Акварель’ (к-49695), ‘Фестивальная’ (к-13569), ‘Мелитопольская урожайная’ (к-14396), ‘Бирюлевская Ранняя’ (к-14194), ‘Зоя Космодемьянская’ (к-14387), ‘Хибинская Красавица’ (к-40273), ‘Macherauchs Marieva’ (к-21410), ‘Бердская Ранняя’ (к-49709), ‘Бердский Рубин’ (к-49712), ‘Лафаня’ (к-49711), ‘Карусель’ (к-49710), ‘Розана’ (к-49707), ‘Танюша’ (к-49708), ‘Кандалакшинская’ (к-16917А), ‘Jonsok’ (к-49739), ‘Казахстанская’ (к-10291), ‘Узбекистанская’ (к-12343), ‘Барабинская’ (к-49715), ‘Солнечная Поляна’ (к-49716), ‘Первоклассница’ (к-49717), ‘Забелинская’ (к-49718), ‘Италмас’ (к-49693), ‘Alba’ (к-45456), ‘Asia’ (к-45455); межвидовые гибриды (к-38147, к-38153, к-38154); *F. mandshurica* (к-49727, к-49728, к-49722, к-49705, к-49726, к-49724); все экотипы *F. orientalis* (к-49706, к-49720, к-49725, к-16929А, к-16926А, к-16927А, к-16928А; *F. vesca* (к-49721, к-49723, к-49731, к-49732, к-49733, к-16918А, к-16952А); все экотипы *F. viridis* (к-16925А, к-49754, к-38142, к-49734, к-49735, к-17725, к-16948А, к-16944А); *F. virginiana* (к-14393).

Заключение

Анализ главных компонент фенологических признаков, товарных и потребительских качеств ягод и урожайности 108 образцов коллекции *Fragaria* ВИР показал, что основными дифференцирующими виды признаками являются число ягод на растении, связанное с количеством цветков, цветоносов, продолжительностью цветения и плодоношения; второй фактор – размер ягоды.

Источником зимостойкости в условиях Северо-Запада РФ могут быть *F. moschata* и *F. viridis*. *F. viridis* и *F. orientalis* обладают комплексной устойчивостью к пятнистостям листьев и серой гнили. *F. vesca* имеет потенциал раннего срока созревания ягод, устойчивости к угловатой пятнистости, к серой гнили. *F. mandshurica* и *F. chiloensis* несут устойчивость к серой гнили. Дикие образцы *F. moschata* показали урожайность 83,9 и 93,9 ц/га, что в сочетании высокой органолептической оценкой делает перспективным их возделывание для любительского садоводства Северо-Запада.

Для объективной полевой оценки зимостойкости растений диких видов рода *Fragaria* вспомогательный учет по изучению степени перезимовки листьев не подходит, поскольку многие экотипы уходят в зиму с побуревшими листьями и сохраняют при этом высокую зимостойкость.

В условиях изменения климата выявлено такое опасное явление в условиях Северо-Западного региона, как осеннее цветение земляники, которое может приводить к снижению числа элементов продуктивности следующего сезона, что требует дальнейшего изучения.

Дикие виды рода *Fragaria* представляют собой перспективный источник устойчивости к болезням, вкусовых качеств, раннеспелости и зимостойкости для расширения сортимента культивируемых видов земляники садовой за счет как отдаленной гибридизации, так и увеличения количества возделываемых видов.

References / Литература

Ather-uz-Zaman, Al-Khayri J.M., Islam R. Genetic improvement of strawberry (*Fragaria* × ananassa Duchesne). In: J. Al-Khayri, S. Jain, D. Johnson (eds). *Advances in Plant Breeding Strategies: Fruits*. Cham: Springer; 2018. p.217-275. DOI: 10.1007/978-3-319-91944-7_6

Bestfleisch M., Luderer-Pflimpfl M., Höfer M., Schulte E., Wünsche J.N., Hanke M.V. et al. Evaluation of strawberry (*Fragaria* L.) genetic resources for resistance to *Botrytis cinerea*. *Plant Pathology*. 2015;64(2):396-405. DOI: 10.1111/ppa.12278

Dale A. How climate change could influence breeding and modern production systems in berry crops. *Acta Horticulturae*. 2009;838:161-168. DOI: 10.17660/ActaHortic.2009.838.27

Dávalos-González P.A, Aguilar-García R., Rodríguez-Guillén A., Jofre-y-Garfias A.E. The genetic diversity of strawberry species, the underutilized gene pool and the need for cultivars with new quality and agronomic attributes. In: N.E.Y. Kafkas (ed.). *Recent Studies on Strawberries*. London: IntechOpen; 2022. p.N/A. DOI: 10.5772/intechopen.102962

FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Food and Agriculture Data: [website]. Available from: https://www.fao.org/faostat/ru/#data/QCL [accessed Dec. 15, 2024].

González G., Moya M., Sandoval C., Herrera R. Genetic diversity in Chilean strawberry (*Fragaria chiloensis*): differential response to *Botrytis cinerea* infection. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 2009;7(4):886-895. DOI: 10.5424/sjar/2009074-1102

Govorova G.F., Govorov D.N. The results of 45-year *Fragaria ananassa* breeding for immunity (Itogi 45-letney selektsii zemlyaniki ananasnoy na immunitet). In: *State and Prospects of Berry Growing Development in Russia (Sostoyaniye i perspektivy razvitiya yagodovodstva v Rossii): Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Orel: VNIISPK; 2006. p.71-78. [in Russian] (Говорова Г.Ф., Говоров Д.Н. Итоги 45-летней селекции земляники ананасной на иммунитет. В кн.: *Состояние и перспективы развития ягодоводства в России: материалы международной научно-практической конференции*. Орел: ВНИИСПК; 2006. С.71-78).

Gruner P., Ulrich D., Neinhuis C., Olbricht K. *Fragaria viridis* Weston: diversity and breeding potential of an underutilised strawberry species. *Acta Horticulturae*. 2017;1156:203-208. DOI: 10.17660/ActaHortic.2017.1156.31

Harbut R.M., Sullivan J.A. Breeding potential of lower ploidy *Fragaria* species (Hedrick student award review paper 2003). *Journal of the American Pomological Society*. 2004;58(1):37-41. DOI: 10.71318/apom.2004.58.1.37

Hirabayashi K., Murch S.J., Erland L.A.E. Predicted impacts of climate change on wild and commercial berry habitats will have food security, conservation and agricultural implications. *Science of the Total Environment*. 2022;845:157341. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157341

Hummer K.E., Bassil N., Njuguna W. *Fragaria*. In: Ch. Kole (ed.). *Wild Crop Relatives: Genomic and Breeding Resources. Temperate Fruits.* Berlin; Heidelberg: Springer; 2011. p.17-44. DOI: 10.1007/978-3-642-16057-8_2

Johnson A.L., Govindarajulu R., Ashman T.L. Bioclimatic evaluation of geographical range in *Fragaria* (Rosaceae): consequences of variation in breeding system, ploidy and species age. *Botanical Journal of the Linnean Society*. 2014;176(1):99-114. DOI: 10.1111/boj.12190

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

Kharchenko A.A., Belevtsova V.I., Chukhina I.G. Strawberry cultivars with *Fragaria orientalis* Losinsk. in their pedigrees. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(2):189-200. [in Russian] (Харченко А.А., Белевцова В.И., Чухина И.Г. Сорта земляники с использованием *Fragaria orientalis* Losinsk. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(2):189-200). DOI: 10.30901/2227-8834-2024-2-189-200

Kharchenko A.A., Chukhina I.G. *Fragaria* L. in the VIR collection. *VIR Bulletin*. 2024;(243):85-93. [in Russian] (Харченко А.А., Чухина И.Г. *Fragaria* L. в коллекции ВИР. *Бюллетень ВИР*. 2024;(243):85-93).

Kharchenko A.A., Novikova L.Yu. Comparison of winter hardiness components in *Fragaria* L. accessions with different phenorhythmotypes in an artificial climate chamber. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(1):121-130. [in Russian] (Харченко А.А., Новикова Л.Ю. Сравнение компонентов зимостойкости образцов рода *Fragaria* L. с разным феноритмотипом в камере искусственного климата. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(1):121-130). DOI: 10.30901/2227-8834-2025-1-121-130

Kharchenko A.A., Novikova L.Yu., Khudonogova E.G. Ecological and phenological features and yield of garden strawberries (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) in the North-Western region of Russia. *Vestnik IrGSHA*. 2022;2(109):55-63. [in Russian] (Харченко А.А., Новикова Л.Ю., Худоногова Е.Г. Эколого-фенологические особенности и урожайность земляники садовой (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) в Северо-Западном регионе России. *Вестник ИрГСХА*. 2022;2(109):55-63). DOI: 10.51215/1999-3765-2022-109-55-63

Liston A., Cronn R., Ashman T.L. *Fragaria*: a genus with deep historical roots and ripe for evolutionary and ecological insights. *American Journal of Botany*. 2014;101(10):1686-1699. DOI: 10.3732/ajb.1400140

Lukyanchuk I.V., Bogdanova O.A. Strawberry resistance to white and brown spots (Ustoychivost zemlyaniki k beloy i buroy pyatnistostyam). *Pomiculture and Small Fruits Culture in Russia*. 2010;24(2):283-288. [in Russian] (Лукьянчук И.В., Богданова О.А. Устойчивость земляники к белой и бурой пятнистостям. *Плодоводство и ягодоводство России*. 2010; 24(2):283-288).

Lyzhin A.S., Luk'yanchuk I.V. Genetic diversity in wild species and cultivars of strawberry for the *FANAAMT* gene controlling fruit flavor volatiles. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021;182(2):72-80. [in Russian] (Лыжин А.С., Лукъянчук И.В. Генетическое разнообразие дикорастущих видов и сортов земляники по гену *FanAAMT* ароматического комплекса плодов. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2021;182(2):72-80). DOI: 10.30901/2227-8834-2021-2-72-80

Mezzetti B., Giampieri F., Zhang Y.T., Zong C.F. Status of strawberry breeding programs and cultivation systems in Europe and the rest of the world. *Journal of Berry Research*. 2018;8(3):205-221. DOI: 10.3233/jbr-180314

Nathewet P., Yanagi T., Hummer K.E., Iwatsubo Y., Sone K. Karyotype analysis in wild diploid, tetraploid and hexaploid strawberries, *Fragaria* (Rosaceae). *Cytologia*. 2009;74(3):355-364. DOI: 10.1508/cytologia.74.355

Porter M., Fan Z., Lee S., Whitaker V.M. Strawberry breeding for improved flavor. *Crop Science*. 2023;63(4):1949-1963. DOI: 10.1002/csc2.21012

Sedov E.N., Ogoltsova T.P. (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. [in Russian] (Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур / под ред. Е.Н Седова, Т.П. Огольцовой. Орел: ВНИИСПК; 1999).

Staudt G. The species of *Fragaria*, their taxonomy and geographical distribution. *Acta Horticulturae*. 1989;265:23-34. DOI: 10.17660/ActaHortic.1989.265

Vining K.J., Davis T.M., Jamieson A.R., Mahoney L.L. Germplasm resources for verticillium wilt resistance breeding and genetics in strawberry (*Fragaria*). *Journal of Berry Research*. 2015;5(4):183-195. DOI: 10.3233/JBR-150096

Zubov A.A. Theoretical foundations of strawberry breeding (Teoreticheskiye osnovy selektsii zemlyaniki). Michurinsk; 2004. [in Russian] (Зубов А.А. Теоретические основы селекции земляники. Мичуринск; 2004).

Информация об авторах

Анастасия Анатольевна Харченко, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, akkhara47@yandex.ru, https:orcid.org/0000-0002-3983-0082

Любовь Юрьевна Новикова, доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, и. о. заведующего отделом, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, l.novikova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0003-4051-3671

Information about the authors

Anastasiia A. Kharchenko, Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, akkhara47@yandex.ru, https:orcid.org/0000-0002-3983-0082

Liubov Yu. Novikova, Dr. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Acting Head of a Department, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, l.novikova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0003-4051-3671

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 01.08.2025; одобрена после рецензирования 07.11.2025; принята к публикации 28.01.2026.
The article was submitted on 01.08.2025; approved after reviewing on 07.11.2025; accepted for publication on 28.01.2026.

КОЛЛЕКЦИИ МИРОВЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СЕЛЕКЦИИ

Научная статья
УДК 633.13:581.192
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o2

CC BY

Биохимические особенности основных разновидностей культурного овса из коллекции ВИР

В. И. Хорева, Т. В. Шеленга, В. С. Попов, Э. Э. Сафонова, Е. В. Блинова, Л. Л. Малышев, И. Г. Лоскутов

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

Автор, ответственный за переписку: Виталий Сергеевич Попов, popovitaly@yandex.ru

Актуальность. Направление использования овса, одной из важнейших зерновых культур, определяется качеством зерна. Цель исследований – изучить особенности химического состава *Avena sativa* L. var. *inermis* Koern., *A. sativa* var. *aurea* Koern. и *A. sativa* var. *mutica* Alef. из коллекции ВИР, выделить образцы – источники высокого содержания белка, крахмала, масла, с высоким и низким содержанием β-глюканов, оптимальным жирнокислотным составом для пищевого и кормового направлений использования, рассмотреть метаболомные профили исследуемых разновидностей овса.
Материал и методы. Материалом для изучения послужили три разновидности овса *A. sativa* различного географического происхождения, репродуцированные в 2021–2023 гг. в условиях Северо-Западного региона РФ. Биохимические показатели определяли по методикам, принятым в ВИР.
Результаты. Изучен химический состав (содержание белка, крахмала, масла, β-глюканов, антиоксидантов, фенольных веществ, жирных кислот, метаболитов) зерна трех разновидностей овса, определяющий его пищевую и кормовую ценность. Установлена изменчивость и взаимосвязь изученных признаков между собой.
Заключение. Образцы голозерного овса достоверно отличались высокими значениями всех изученных показателей по сравнению с пленчатыми. Найдены достоверные различия в химическом составе зерновок разновидностей овса посевного. Образцы овса посевного, различающиеся по наличию пленки и окраске цветковой чешуи (белой и желтой), достоверно отличаются по интенсивности основных физиолого-биохимических процессов. Выявлены потенциальные возможности использования отдельных генотипов *A. sativa* и выделены образцы пищевого и кормового назначения – источники ценных признаков для различных направлений селекции.

Ключевые слова: *Avena sativa* L., пленчатый овес, голозерный овес, var. *aurea*, var. *mutica*, var. *inermis*, зерно, белок, крахмал, масло, β-глюканы, антиоксиданты, фенольные вещества, жирные кислоты, неспецифическое метаболомное профилирование

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-00005, https://rscf.ru/project/23-76-00005/.

Для цитирования: Хорева В.И., Шеленга Т.В., Попов В.С., Сафонова Э.Э., Блинова Е.В., Малышев Л.Л., Лоскутов И.Г. Биохимические особенности основных разновидностей культурного овса коллекции ВИР. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(1):165-179. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o2

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

© Хорева В.И., Шеленга Т.В., Попов В.С., Сафонова Э.Э., Блинова Е.В., Малышев Л.Л., Лоскутов И.Г., 2026

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

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o2

Biochemical characteristics of the main botanical varieties of cultivated oats from the VIR collection

Valentina I. Khoreva, Tatiana V. Shelenga, Vitaliy S. Popov, Elvira E. Safonova, Elena V. Blinova, Leonid L. Malyshev, Igor G. Loskutov

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

Corresponding author: Vitaliy S. Popov, popovitaly@yandex.ru

Background. The uses of oat, one of the most important cereal crops, are predetermined by the quality of its grain. The objective was to study the chemical composition features in *Avena sativa* L. var. *inermis* Koern., *A. sativa* var. *aurea* Koern., and *A. sativa* var. *mutica* Alef. in order to identify accessions from the VIR collection that could serve as sources of high protein, starch, oil, high and low beta-glucan content, and optimal fatty acid composition for food and feed purposes, and to analyze the metabolic profiles of the studied oat varieties.
Materials and methods. The studied material represented three botanical varieties of *A. sativa* of different geographic origin, reproduced in 2021–2023 in Northwest Russia. Biochemical parameters were assessed according to the guidelines adopted by VIR.
Results. The chemical composition (the content of protein, starch, oil, beta-glucans, antioxidants, phenolic compounds, fatty acids, and metabolites) in the grain of three oat varieties was analyzed, and its nutritional food and feed value was established. The variability and interrelations among the studied features were identified.
Conclusion. The naked oat accessions significantly differed from the covered ones in higher values of all the studied parameters. Statistically significant differences were found in the chemical composition of the grain in the three oat varieties. *A. sativa* accessions, differing in the presence/absence of the hull and the color of the flower glumes (white or yellow), also manifested significant differences in the intensity of major physiological and biochemical processes. Potential possibilities of using individual genotypes of cultivated oats were revealed, and accessions were identified as sources of valuable traits for various areas of breeding for food and feed purposes.

Keywords: *Avena sativa* L., covered oat, naked oat, var. *aurea*, var. *mutica*, var. *inermis*, grain, protein, starch, oil, *β*-glucans, antioxidants, phenolic compounds, fatty acids, untargeted metabolomic profiling

Acknowledgments: the study was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 23-76-00005, https://rscf.ru/project/23-76-00005/.

For citation: Khoreva V.I., Shelenga T.V., Popov V.S., Safonova E.E., Blinova E.V., Malyshev L.L., Loskutov I.G. Biochemical characteristics of the main botanical varieties of cultivated oats from the VIR collection. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(1):165-179. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o2

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Овес посевной (*Avena sativa* L.) – одна из наиболее важных зерновых культур в мировом производстве зерна, возделывается в основном в умеренной зоне Европы, Азии и Северной Америки (Skryabin et al., 2020). *A. sativa* включает 29 разновидностей, среди которых наиболее распространенными являются три: *A. sativa* var. *aurea* Koern., как правило, встречается в Азии и Западной Европе; *A. sativa* var. *mutica* Alef. распространена на всех континентах; *A. sativa* var. *inermis* Koern. встречается почти повсеместно, кроме Австралии и Африки (Rodionova et al., 1994). Широкое использование овса в пищевой и кормовой промышленности определяется ценным химическим составом зерна (Heneen et al., 2009; Urubkov et al., 2018). Овес является безопасным дополнением к безглютеновой диете. С 2009 (EC 41/2009 – European Commission) и 2013 г. (FDA – Food and Drug Administration) овсяные продукты могут применяться как безглютеновые при содержании клейковины в зерне ниже 20 ppm (20 мг глютена на 1 кг зерна) (Loskutov, Polonskiy, 2017). В зависимости от генотипа и условий выращивания химический состав зерна отличается большой изменчивостью (Wang, Frei, 2011). Мировая коллекция овса в ВИР насчитывает около 14 000 образцов. Всестороннее изучение коллекции позволит выделить образцы – источники для более эффективного использования в пищевой, кормовой промышленности и селекции.

Цель исследования – проследить за изменчивостью химического состава зерна образцов трех разновидностей овса посевного (*A. sativa* var. *mutica*, *A. sativa* var. *aurea* и *A. sativa* var. *inermis*) из коллекции ВИР, выращенных в условиях Северо-Западного региона РФ (г. Пушкин) за период с 2021 по 2023 г.; выделить образцы – источники высокого содержания белка, крахмала, масла, антиоксидантов, фенольных веществ (ФВ), отдельных жирных кислот (ЖК), повышенного и низкого содержания β-глюканов.

Материалы и методы

Материалом для изучения послужили 37 образцов культурного овса, вновь поступивших в коллекцию ВИР, различного географического происхождения из 9 стран мира, выращенные в течение 2021–2023 гг. в условиях Северо-Западного региона РФ. В нашем исследовании представлены две пленчатые разновидности подвида *A. sativa* subsp. *sativa* – var. *aurea* (окраска цветковых чешуй желтая) – 16 образцов; var. *mutica* (окраска цветковых чешуй белая) – 13 образцов; одна голозерная разновидность подвида *A. sativa* subsp. *nudisativa* (Husnot.) Rod. et Sold.) – var. *inermis* – 8 образцов (Electronic Supplementary Materials, Suppl. 1)[1].

Посев, наблюдения и уборку выполняли в соответствии с методическими рекомендациями по изучению и сохранению мировой коллекции ячменя и овса (Loskutov et al., 2012) в условиях научно-производственной базы «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» в 2021–2023 гг. Стандартом послужил районированный в регионе сорт ‘Привет’ (к-14787, Московская обл.), одобренный для крупномасштабного сельскохозяйственного производства в Северо-Западном регионе. Перед проведением биохимических анализов неочищенное от пленок зерно измельчали до размера частиц менее 10 мкм. Исследования проводили в соответствии с ранее опубликованными методами и по методам, принятым в ВИР (Popov et al., 2022). Значения пересчитывали на сухое вещество.

По данным за три года (2021–2023 гг.), в г. Пушкине средняя температура воздуха в июне составила 15,3°С, количество осадков – 26,1 мм; в июле – 18,6°С и 30,6 мм; в августе – 16,6°С и 35,8 мм (https://pogoda.365c.ru/russia/pushkin). Значения гидротермического коэффициента (ГТК) для климата с избыточным увлажнением, или зоны дренажа: > 1,3; обеспеченного увлажнения: 1,0–1,3; засушливого: 0,7–1,0; сухого земледелия: 0,5–0,7; ирригации: < 0,5. Погодные условия в годы изучения были различными (Electronic Supplementary Materials, Suppl. 2, Suppl. 3)[2, 3]: в период налива и созревания зерна в 2021 г. ГТК составил 0,79; в 2022 г. – 1,52; в 2023 г. – 0,85; то есть 2022 характеризуется как более влажный год.

Статистическая обработка проводилась с использованием программных пакетов Statistica 7.0 и Microsoft Excel 7.0 для Windows и включала в себя однофакторный дисперсионный анализ ANOVA (Analysis of Variance), факторный анализ по методу главных компонент, дискриминантный и корреляционный анализы.

Результаты и обсуждение

Оценка содержания белка

Содержание и качество белка в зерне являются одними из основных показателей, с которым связаны питательные и кормовые достоинства культуры. Общеизвестна закономерность: содержание белка у зерновых культур, выращенных в северных районах, увеличивается при продвижении посевов на юг и с запада на восток (Pleshkov, 1987). Отмечается, что у сортов различного происхождения, выращенных на территории РФ, содержание белка у пленчатых форм колеблется от 7,8% до 19,8%. В зерне овса посевного *A. sativa* репродукции Московской обл. у голозерных разновидностей var. *chinensis* (Fisch. ex Roem. & Schult.) Doell., *inermis*, *maculata* Mordv. ex Rod. et Sold. содержание белка варьирует от 15,46% до 18,2%. У пленчатых образцов этого же вида вариативность значительно ниже – 9,48–13,3% (Horeva et al., 2018). У пленчатого овса казахстанских сортов межсортовая изменчивость по содержанию белка составила 10,4–21,0%. Также прослеживается более высокое содержание белка у сортов голозерного овса, выращенных в условиях юго-востока Казахстана, по сравнению с условиями севера (Abugalieva et al., 2021). В зерне овса, выращенного в Красноярском крае (Восточная Сибирь), у голозерных сортов содержание белка находилось в диапазоне 14,86–16,88%, у пленчатых сортов – 11,69–15,10% (Polonskiy et al., 2019). В Западной Сибири районированные пленчатые сорта овса характеризуются более низким содержанием белка, в среднем 10,7–12,0% (Kozlova, Akimova, 2009).

Изученные нами образцы характеризуются значительной вариабельностью по содержанию белка. У плен-

[1] Приложение 1 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 1. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2

[2] Приложение 2 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 2. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2

[3] Приложение 3 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 3. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2

чатых сортов *A. sativa* var. *aurea* сортовая изменчивость составила от 2,99% (12,04–15,03%, 2021 г.) до 4,12% (12,36–15,84%, 2023 г.); сортовые различия у *A. sativa* var. *mutica* более выражены в зерне урожая 2021 г. – 3,57% (12,06–15,63%), а у сортов голозерного овса *A. sativa* var. *inermis* различия составили от 3,35% (зерно урожая 2022 г.) до 4,02% (зерно урожая 2023 г.). Более низкое содержание белка у большинства сортов отмечено в зерне урожая 2022 г. Как уже упоминалось выше, 2022 г. характеризуется как более влажный и, значит, менее благоприятный для формирования зерновок и синтеза в них белка (Novikov, 2012). По результатам исследования различий между разновидностями *A. sativa* var. *aurea* и *A. sativa* var. *mutica* не выявлено. В наших исследованиях просматривается влияние генотипа на накопление белка. Устойчиво повышенное содержание белка в разные годы выращивания в Северо-Западном регионе РФ сохраняли образцы *A. sativa* var. *aurea*: к-15770 (Россия) – 13,43–14,01%, к-15781 (Чехия) – 13,58–14,97%, к-15805 (Бразилия) – 14,90–15,03%; образцы *A. sativa* var. *mutica*: к-15765 (Россия) – 14,34–15,25%, к-15784 (Чехия) – 14,32–15,63%; образцы *A. sativa* var. *inermis*: к-15759 (Россия) – 18,30–19,19%, к-15719 (Китай) – 18,24–21,09%, а также сорт-стандарт – 12,00–13,72% (Electronic Supplementary Materials, Suppl. 4)[4].

Оценка содержания крахмала

Важным источником энергии в пищевом рационе человека являются полисахариды, большая часть которых состоит из крахмала. При этом положительным для здоровья человека фактором является то, что крахмал зерновых культур в желудочно-кишечном тракте ферментируется и усваивается медленно, тем самым не вызывая резкого скачка сахара в крови. В зависимости от вида и сорта овса содержание крахмала в зерне составляет 23,7–69,5% (Horeva et al., 2018). По своей структуре крахмал овса стоит ближе к наиболее крахмалистой культуре – рису и значительно отличается от крахмала пшеницы. По данным Г. Я. Козловой и О. В Акимовой, содержание крахмала – относительно стабильный показатель, который в меньшей степени (по сравнению с содержанием белка) зависит от условий выращивания (Kozlova, Akimova, 2009). Однако для образования углеводов требуется больше влаги, чем для синтеза белков, поэтому при влажной погоде и в условиях прохладного климата в растениях происходит повышенное накопление простых и сложных углеводов. При этом по содержанию крахмала пленчатые сорта уступают голозерным (48% против 57%) (Novikov, 2012). Устойчивых различий между *A. sativa* var. *aurea* и *A. sativa* var. *mutica* нами не выявлено, но сортовая изменчивость по содержанию крахмала в зависимости от условий выращивания довольно велика. В среднем за три года диапазон изменчивости по содержанию крахмала составил для сортов *A. sativa* var. *aurea* 40,25–48,24%, для сортов *A. sativa* var. *mutica* – 36,85–49,88%, и для *A. sativa* var. *inermis* – 54,37–63,02%; для стандарта – 40,25–45,70%. Наибольшая изменчивость по содержанию крахмала наблюдается в зерне в 2021 г. у образцов *A. sativa* var. *mutica*, у которых эти различия составили 13,03%; наименьшая – 3,03% – в 2023 г. у сортов *A. sativa* var. *inermis* (см. Electronic Supplementary Materials, Suppl. 4).

Данные показывают различную реакцию генотипов на условия выращивания (температурного режима и количества осадков). Такое варьирование признака можно объяснить различной интенсивностью притока углеводов в зерновки, скоростью синтеза крахмала, происходящего при созревании зерновок, и реакцией сортов на условия выращивания. Так, в пределах одной разновидности *A. sativa* var. *aurea* количество крахмала в зерне в 2021 г. в среднем на 2,23% меньше, чем в 2022 г., и на 1,76% меньше, чем в 2023 г.; у сортов *A. sativa* var. *mutica* – крахмала в 2021 г. меньше на 3,35% по сравнению с 2022 г. и на 1,79% меньше, чем в 2023 г. *A. sativa* var. *inermis* характеризуется наибольшей изменчивостью в 2021 г.; сортовые различия составили 1,62–4,23%. На фоне значительных сортовых различий по содержанию крахмала нами выделены образцы с наиболее высоким его содержанием в зерне: *A. sativa* var. *aurea* – к-15705 (Словакия) – 46,21–47,39%, к-15774 (Германия) – 45,65–47,92%, к-15779 (Польша) – 45,88–47,86%; *A. sativa* var. *mutica* – к-15762 (Россия) – 45,12–46,97%, к-15784 (Чехия) – 44,81–49,88%; *A. sativa* var. *inermis* – к-15754 (Россия) – 57,97–61,90%, к-15776 (Польша) – 59,06–63,02%; стандарт – 40,24–45,83% (см. Electronic Supplementary Materials, Suppl. 4).

Оценка содержания масла

Питательная и биологическая ценность овса также определяется содержанием масла и его жирнокислотным составом. Большая часть масла содержится в субалейроновых клетках и в клетках эндосперма зерна овса, в непосредственной близости от щитка и зародыша (Peterson et al., 2005). Таким образом, основная часть масла находится вблизи тканей зародыша – участков синтеза ферментов, что связано с выполнением физиологических функций, активирующихся во время прорастания. Если селекция по созданию высоколипидного овса будет успешна, это позволит в будущем отнести овес к масличным культурам, которые могут быть использованы в химической и медицинской промышленностях (Heneen et al., 2009).

Согласно литературным данным, содержание масла в зерне пленчатых сортов различного происхождения колеблется в пределах от 3,5% до 6,2%; голозерных – от 7,1% до 9,0%. Исследование голозерных линий овса, выращенных в Волго-Вятском регионе, показало изменчивость масла от 5,91% до 7,87%. В то же время в образцах голозерного овса из Восточной Сибири содержание масла выше и составляет 7,28–9,01% (Polonskiy et al., 2019). По данным наших исследований, сортовая изменчивость по содержанию масла в зависимости от условий выращивания значительна. В среднем за три года диапазон изменчивости составил для сортов *A. sativa* var. *aurea* 3,27–5,38%, для сортов *A. sativa* var. *mutica* – 4,07–6,20%, и для *A. sativa* var. *inermis* – 4,70–8,52%; для стандарта – 4,62–5,36%.

В изученных нами образцах овса максимальная сортовая изменчивость в зависимости от условий выращивания по содержанию масла – в зерне образцов *A. sativa* var. *inermis* урожая 2022 г., у которых эти различия составили 3,82%, наименьшая – 1,61% в зерне сортов *A. sativa* var. *aurea* урожая 2021 г. По результатам исследования за годы изучения меньшее содержание масла выявлено у образцов разновидности *A. sativa* var. *aurea*, по сравнению с *A. sativa* var. *mutica* и *A. sativa* var. *inermis*. На фоне небольшой изменчивости нами выделены 6 источников повышенного содержания масла: *A. sativa* var. *aurea* –

[4] Приложение 4 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 4. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2

к-15778 (Польша) – 5,05–5,38%; *A. sativa* var. *mutica* – к-15762 (Россия) – 5,78–6,15% и к-15763 (Россия) – 5,63–5,85%; *A. sativa* var. *inermis* – к-15713 (Латвия) – 5,87–7,89%, к-15755 (Россия) – 6,0–8,31% и к-15776 (Польша) –7,71–8,05%; при сравнении со стандартом – 4,62–5,36% (см. Electronic Supplementary Materials, Suppl. 4).

Оценка жирнокислотного состава масла

Анализ литературных данных показал, что жирнокислотный состав масла в зерне овса представлен пальмитиновой (C16:0), стеариновой (C18:0), олеиновой (C18:1), линолевой (C18:2) и линоленовой (C18:3) кислотами. Содержание пальмитиновой кислоты в масле овса составляет 15,8–17,6%, олеиновой – 36,6–43,8%, линолевой – 37,7–42,9%. Олеиновая и линолевая кислоты преобладают в составе масла. На долю линоленовой (18:3) кислоты, быстро окисляющейся, приходится низкий процент – 0,7–2,48%, поэтому масло из зерна овса достаточно стойкое к окислению. Суммарное количество линолевой, олеиновой и пальмитиновой кислот достигает 90–95%, стеариновой и линоленовой – по 1–4%, что указывает на высокие пищевые достоинства масла (Batalova, 2014). У образцов овса южных регионов содержание пальмитиновой кислоты в зависимости от сорта изменяется от 10,8% до 22,4%, олеиновой – от 19,6% до 37,9%, линолевой – от 18,9% до 54,0%; содержание насыщенных жирных кислот в образцах масла определяется между 15,6% и 34,4%, содержание ненасыщенных жирных кислот – между 65,6% и 84,2% (Ahmet et al., 2019). По данным В. Н. Красильникова и др., в масле голозерного овса в условиях северо-востока РФ содержание пальмитиновой кислоты составляет 15,3–17,8%, олеиновой – 33,5–36,7%, линолевой – 36,2–38,7% (Krasilnikov et al., 2018). В наших исследованиях показана значительная сортовая изменчивость по содержанию пальмитиновой – от 11,65% (var. *aurea*, 2023) до 25,87% (var. *inermis*, 2022), олеиновой – от 13,91% (var. *inermis*, 2022) до 54,50% (var. *aurea*, 2023) и линолевой – от 28,59% (var. *aurea*, 2023) до 63,08% (var. *inermis*, 2022) кислот.

Биологическая активность масла определяется соотношением линолевой кислоты к олеиновой, которое должно приближаться к единице. В образцах голозерного овса из Казахстана соотношение линолевой / олеиновой кислот варьировало от 0,4–0,6 до 1,5–1,7. Количество ненасыщенных жирных кислот – от 58,9% до 79,7% (Abugalieva et al., 2021). Для масла изученных нами пленчатых разновидностей овса соотношение линолевой к олеиновой кислоте было наиболее близким к оптимальному и находилось в диапазоне от 0,6 до 1,3; для образцов *A. sativa* var. *inermis* выше – от 1,3 до 2,6 за счет пониженного содержания олеиновой кислоты и повышенного линолевой. В среднем за три года диапазон изменчивости по содержанию основных жирных кислот составил для изученных нами сортов *A. sativa* var. *aurea* 11,65–18,32% (пальмитиновая), 29,16–54,50% (олеиновая), 28,59–52,76% (линолевая); для сортов *A. sativa* var. *mutica* – 13,46–18,86% (пальмитиновая), 37,13–51,39% (олеиновая), 31,60–44,77% (линолевая); для сортов *A. sativa* var. *inermis* – 18,04–25,87% (пальмитиновая), 13,91–42,27% (олеиновая), 33,94–63,08% (линолевая); для стандарта – 14,22–18,09% (пальмитиновая), 38,13–50,11% (олеиновая), 32,44–41,98% (линолевая). Количество стеариновой и линоленовой кислоты не превышало 3% и 1% соответственно. Разновидность *inermis* отличалась более высоким содержанием насыщенных (19,11–27,02%) жирных кислот, а пленчатые разновидности овса – ненасыщенных (79,64–86,45%). Наиболее стабильным признаком практически для всех разновидностей овса за весь период изучения оказалось содержание пальмитиновой, олеиновой и линолевой, насыщенных и ненасыщенных жирных кислот и отношение ненасыщенных жирных кислот к насыщенным. Показатель *CV* (коэффициент вариации) для этих кислот не превышал 10%. Самым изменчивым было содержание стеариновой кислоты в масле пленчатых разновидностей овса и линоленовой в масле практически всех изученных образцов. Остальные характеристики жирнокислотного состава имели среднюю степень изменчивости (Electronic Supplementary Materials, Suppl. 5)[5].

Оценка содержания β-глюканов

Овес представляет собой потенциально наименее дорогой источник β-глюканов; кроме того, не зарегистрированы никакие побочные эффекты после употребления диеты, богатой β-глюканами, из овсяной муки. В то же время в кормопроизводстве актуальна проблема снижения количества пищевых волокон, проявляющих антипитательные свойства, у фуражного зерна (Loskutov, Polonskiy, 2017). Литературные данные о количестве β-глюканов в зерне *A. sativa*, представленные в различных источниках, противоречивы. Так, по данным В. И. Полонского и др., не обнаружено заметного преимущества по содержанию β-глюканов у голозерных образцов по сравнению с пленчатыми. В образцах голозерного овса Красноярского края содержание β-глюканов – 3,73-4,77%, у пленчатых – 2,90-5,17% (Polonskiy et al., 2019). В популяции из 1700 линий шведского сорта овса ‘Belinda’, полученных с помощью мутагенеза, обнаружены образцы с содержанием β-глюканов в зерновке от 1,8% до 7,5% (Loskutov, Polonskiy, 2017). В условиях юго-востока Казахстана содержание β-глюканов находилось в диапазоне 4,1–5,4%. На севере Казахстана содержание β-глюканов было выше – 6,9% (Abugalieva et al., 2021). Содержание β-глюканов в образцах овса, выращенного в Вигляш-Пструше (Словацкая Республика) в 2003 г., варьировало от 3,1% до 4,7% (для пленчатых) и от 5,8% до 6,8% (для голозерных образцов) (Brindzova et al., 2008). Немного более низкое содержание β-глюканов наблюдалось среди греческих образцов овса (2,1–3,9%) (Papageorgiou et al., 2005).

В нашем исследовании проведено определение β-глюканов с целью выделения сортов овса с высоким и низким содержанием для различных направлений селекции, а также для пищевого и кормового использования. Выявлена сортовая изменчивость и реакция сортов на условия выращивания. Амплитуда межсортовой изменчивости β-глюканов составила в среднем за три года для сортов *A. sativa* var. *aurea* 2,80–3,68%, для сортов *A. sativa* var. *mutica* – 2,68–3,67%, для *A. sativa* var. *inermis* – 3,29–3,90%; для стандарта – 3,31–3,52%. В изученных образцах овса максимальные сортовые различия по содержанию β-глюканов (1,67%) наблюдали в зерне урожая 2021 г. в образцах *A. sativa* var. *inermis*, минимальные (0,58%) – в зерне урожая 2022 г. у сортов *A. sativa* var. *aurea* (см. Electronic Supplementary Materials, Suppl. 4). При сравнении данных за годы изучения не отмечается определенной зависимости от погодных условий и от

[5] Приложение 5 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 5. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2

разновидностей по содержанию β-глюканов, но сортовые различия сохраняются. В литературе также отмечается, что высокая температура воздуха во время стадии роста и значительные осадки приводят к снижению содержания β-глюканов в зерне (Samchenko, Merkucheva, 2015). На фоне такой изменчивости нами выделены образцы с повышенным содержанием β-глюканов: *A. sativa* var. *aurea* – к-15779 (Польша) – 3,39–3,60%, к-15783 (Чехия) – 3,23–3,68%; *A. sativa* var. *mutica* – к-15784 (Чехия) – 3,35–3,67%; *A. sativa* var. *inermis* – к-15755 (Россия) – 4,14–5,03% и пониженным их содержанием: *A. sativa* var. *mutica* – к-15763 (Россия) – 2,68–2,96%; стандартный сорт – 3,31–3,52% (см. Electronic Supplementary Materials, Suppl. 4).

Оценка содержания фенольных веществ (ФВ)

Биологическая ценность овса определяется также содержанием ФВ. Согласно литературным данным, общее их количество в образцах овса, выращенного в Вигляш-Пструше (Словацкая Республика) в 2003 г., значительно различалось между сортами (23,9–66,2 мг%) (Brindzova et al., 2008). Более низкая изменчивость по содержанию ФВ отмечается у образцов из региона Среднего Запада США – от 23,8 мг% до 27,8 мг% (Emmons, Peterson, 1999). Особенно высокая концентрация ФВ обнаружена у южноазиатского овса, выращенного в Пакистане (124,2–203,6 мг%) (Manzoor et al., 2020). По данным наших исследований, сортовые различия по содержанию фенолов в разные годы выращивания довольно значительны. В среднем за три года диапазон их изменчивости составил для сортов *A. sativa* var. *aurea* 63,41–117,0 мг%, для сортов *A. sativa* var. *mutica* – 59,83–114,05 мг% и для *A. sativa* var. *inermis* – 109,03–124,86 мг%; для стандарта – 81,64–108,7 мг%. В изученных образцах овса максимальная сортовая изменчивость в зависимости от условий выращивания по содержанию ФВ наблюдалась в зерне образцов *A. sativa* var. *mutica* урожая 2022 г., у которых эти различия составили 49,24 мг%, минимальная – 8,62 мг% в зерне урожая 2023 г. у сортов *A. sativa* var. *inermis*. В среднем, общее содержание ФВ выше у *A. sativa* var. *aurea* и особенно у *A. sativa* var. *inermis* по сравнению с *A. sativa* var. *mutica*. Нами выделены образцы с повышенным содержанием ФВ: *A. sativa* var. *aurea* – к-15707 (Словакия) – 83,22–111,87 мг%; *A. sativa* var. *mutica* – к-15761 (Россия) – 77,57–114,05 мг%; *A. sativa* var. *inermis* – к-15719 (Китай) – 120,25–124,86 мг%; стандарт – 81,64–108,70 мг% (см. Electronic Supplementary Materials, Suppl. 4).

Оценка антиоксидантной активности (АОА)

Высокое содержание антиоксидантов и их биологическая активность характерны для овощей и фруктов, однако исследований, посвященных определению АОА, у зерновых культур недостаточно, хотя они считаются одним из основных продуктов питания (Yashin et al., 2012). Овес характеризуется наличием целого ряда компонентов с повышенной АОА. Образцы овса посевного, выращенные в 2012 г. на поле в Научно-исследовательском институте растениеводства в Пьештянах (Словацкая Республика), по содержанию антиоксидантов варьировали от 0,06 до 22,8 мг% (в единицах Тролакса) и различались в зависимости от сорта. Наиболее высокая АОА обнаружена у голозерных овсов (30,26 мг%) (Chmelová et al., 2015).

По данным наших исследований, сортовые различия по АОА в разные годы выращивания довольно значительны. В среднем за три года диапазон изменчивости составил для сортов *A. sativa* var. *aurea* 7,58–12,49 мг%, для сортов *A. sativa* var. *mutica* – 7,18–11,65 мг%, для *A. sativa* var. *inermis* – 9,17–21,88 мг%; для стандарта – 11,38–11,68 мг%. Аналогичные результаты представлены в литературе: наибольшее содержание антиоксидантов обнаружено в голозерных образцах *A. sativa* var. *inermis*, затем в желтых *A. sativa* var. *aurea* и меньше всего – в белых образцах овса *A. sativa* var. *mutica* (Chmelová et al., 2015). В изученных образцах овса максимальная сортовая изменчивость АОА в зависимости от условий выращивания наблюдается в зерне урожая 2022 г. образцов *A. sativa* var. *inermis*, у которых эти различия составили 12,57 мг%, минимальная – 2,99 мг% в зерне урожая 2023 г. у сортов *A. sativa* var. *mutica*. По результатам наших исследований выделены образцы с повышенной АОА: *A. sativa* var. *aurea* – к-15756 (Россия) – 10,71–11,03 мг%; *A. sativa* var. *mutica* – к-15693 (Россия) – 10,61–11,34 мг%; *A. sativa* var. *inermis* – к-15713 (Латвия) – 14,42–18,31 мг% и к-15754 (Россия) – 17,81–21,88 мг%; стандарт – 11,23–11,68 мг% (см. Electronic Supplementary Materials, Suppl. 4). Активность овса по удалению радикалов не зависела от разновидности, но голозерные формы зерна показали более высокую способность к удалению радикалов. Выделенные сорта овса показывают более высокую способность поглощать активные радикалы, по сравнению с остальными сортами.

Статистическая обработка

Оценка корреляционных зависимостей

Помимо выявления источников повышенного содержания признаков качества зерна – белка, крахмала, масла, β-глюканов, для успешного развития селекционных работ важное значение имеет выявление корреляционных связей между биохимическими признаками качества зерна. Результаты корреляционного анализа представлены в таблице.

По шкале Чеддока коэффициенты корреляции соответствуют: от 0 до 0,3 – очень слабая; от 0,3 до 0,5 – слабая; от 0,5 до 0,7 – средняя; от 0,7 до 0, 9 – высокая; от 0,9 до 1 – очень высокая. Между содержанием белка и крахмала отмечается слабая отрицательная корреляция у всех образцов *A. sativa* var. *aurea* (r = –0,15 в 2021 г., r = –0,27 в 2022 г. и r = 0,24 в 2023 г.), но более высокие отрицательные значения выявлены у голозерного овса *A. sativa* var. *inermis* (r = –0,83; r = –0,67; r = –0,28 соответственно), и только у *A. sativa* var. *mutica* в основном положительная корреляционная связь (r = 0,32 в 2021 г. и r = 0,73 в 2022 г.). Между содержанием крахмала и масла наблюдается положительная связь во все годы изучения у пленчатых *A. sativa* var. *aurea*, *A. sativa* var. *mutica* и голозерных форм *A. sativa* var. *inermis*, но более высокий коэффициент корреляции (r = 0,51) обнаружен у *A. sativa* var. *aurea* в 2022 г. и у *A. sativa* var. *mutica* (r = 0,64) в 2023 г. В литературе отмечается, что при усиленном синтезе белков уменьшается количество углеводов, из которых образуются жиры, поэтому между содержанием белков и жиров часто бывает обратная зависимость. Этим можно объяснить различные значения корреляционных связей между содержанием белка и крахмала (Seryakova, 1971).

Между содержанием белка и β-глюканами показана как небольшая отрицательная связь в 2021 г. у *A. sativa* var. *aurea* (r = –0,16) и в 2022 и 2023 г. у *A. sativa* var. *inermis* (r = –0,30 и r = –0,28 соответственно), так и положительная – у *A. sativa* var. *mutica* (r = 0,17 в 2021 г. и r = 0,12

Таблица. Значения коэффициентов корреляции между изучаемыми признаками у разновидностей овса
Table. Values of the correlation coefficients among the studied characters in cultivated oat varieties

Признак / Character	Белок / Protein			Крахмал / Starch			Масло / Oil		
	2021	2022	2023	2021	2022	2023	2021	2022	2023
Avena sativa* var. *aurea									
Крахмал / Starch	–0,15	–0,27	–0,24	1,00	1,00	1,00	—	—	—
Масло / Oil	–0,28	–0,09	–0,28	0,42	0,51	0,36	1,00	1,00	1,00
β-глюканы / *β*-glucans	–0,16	0,03	0,02	0,29	–0,26	0,31	0,59	–0,30	0,01
A. sativa* var. *mutica									
Крахмал / Starch	0,32	0,73	–0,08	1,00	1,00	1,00	—	—	—
Масло / Oil	–0,07	0,18	–0,57	0,42	0,35	0,64	1,00	1,00	1,00
β-глюканы / *β*-glucans	0,17	0,12	0,60	0,10	–0,25	–0,48	–0,26	0,22	–0,80
A. sativa* var. *inermis									
Крахмал / Starch	–0,83	–0,67	–0,28	1,00	1,00	1,00	—	—	—
Масло / Oil	–0,29	–0,26	0,07	0,29	0,39	0,09	1,00	1,00	1,00
β-глюканы / *β*-glucans	0,06	–0,30	–0,28	0,37	0,55	–0,18	–0,04	–0,37	–0,26

в 2022 г.), причем в 2023 г. – более значительная (r = 0,60). Противоречивые результаты по взаимосвязи содержания белка и β-глюканов сообщаются в публикациях (Loskutov, Polonskiy, 2017).

Между содержанием крахмала и β-глюканами установлена отрицательная связь в 2021 г. у *A. sativa* var. *aurea* (r = –0,26), у *A. sativa* var. *mutica* – в 2022 г. и в 2023 г. (r = –0,25 и r = –0,48 соответственно); у голозерных форм *A. sativa* var. *inermis* положительная корреляция отмечена в 2021 г. (r = 0,37) и в 2023 г. (r = 0,55). Ряд авторов отмечают, что высокое содержание крахмала сопровождается низким содержанием глюканов (Papageorgiou et al., 2005).

В литературе отмечается высокая положительная связь между содержанием масла и β-глюканов в зерне пленчатых сортов в разные годы выращивания (Polonskiy et al., 2019). По результатам наших исследований положительная корреляция (r = 0,59) выявлена у образцов *A. sativa* var. *aurea* в 2021 г. и незначительная положительная (r = 0,22) – у образцов *A. sativa* var. *mutica* в 2022 г., тогда как в остальные годы изучения характерна отрицательная корреляция между этими признаками; у *A. sativa* var. *mutica* в 2023 г. коэффициент обратной корреляции более значимый (r = –0,80).

Такие неоднозначные уровни корреляционных связей между изученными признаками у пленчатых и голозерных разновидностей *A. sativa* обусловлены особенностью генотипов и их реакцией на условия выращивания.

Оценка достоверности различий

Изученные нами разновидности овса различались по основным показателям хозяйственной ценности зерна. Образцы голозерного овса достоверно отличались высокими значениями масла, крахмала, β-глюканов, АОА, суммы ФВ и белка за весь период изучения (Electronic Supplementary Materials, Suppl. 6, Suppl. 7, Suppl. 8, Suppl. 9, Suppl. 10, Suppl. 11)[6, 7, 8, 9, 10, 11]. Данные, полученные для зерновок пленчатых разновидностей овса, были значительно ниже. Жирнокислотный состав масла образцов изученных разновидностей овса также имел существенные отличия. У зерновок голозерного овса он характеризовался самыми высокими значениями пальмитиновой кислоты (Electronic Supplementary Materials, Suppl. 12)[12], хотя у пленчатых образцов в 2023 г. содержание стеариновой кислоты было больше (Electronic Supplementary Materials, Suppl. 13)[13]. Сумма насыщенных жирных кислот

[6] Приложение 6 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 6. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2

[7] Приложение 7 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 7. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2

[8] Приложение 8 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 8. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2

[9] Приложение 9 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 9. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2

[10] Приложение 10 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 10. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2

[11] Приложение 11 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 11. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2

[12] Приложение 12 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 11. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2

[13] Приложение 13 представлено в онлайн-формате. Электронная

за все годы изучения была достоверно выше у голозерного овса var. *inermis* (Electronic Supplementary Materials, Suppl. 14)[14]. Ненасыщенные жирные кислоты: олеиновая, и линоленовая (Electronic Supplementary Materials, Suppl. 15, Suppl. 16)[15, 16] лучше представлены в жирнокислотном составе масла пленчатых зерновок, масло которых достоверно отличалось суммой ненасыщенных жирных кислот (Electronic Supplementary Materials, Suppl. 17)[17]. Однако за все годы изучения для масла голозерных образцов характерны значительные количества линолевой кислоты (Electronic Supplementary Materials, Suppl. 18)[18]. Особенности жирнокислотного состава влияют на соотношение ненасыщенных и насыщенных жирных кислот (жирнокислотный индекс), которое было достоверно выше у пленчатых образцов (Electronic Supplementary Materials, Suppl. 19)[19], что делает эти разновидности овса перспективными для расширения сортимента продуктов функционального питания, в том числе купажированного масла.

Динамика изменчивости биохимических показателей у разновидностей овса за годы изучения была разной, что, видимо, связано как с генетическими особенностями разновидностей овса, так и климатическими особенностями года репродукции. Благоприятным оказался 2021 г. для накопления белка и линоленовой кислоты у образцов *A. sativa* var. *inermis* и *A. sativa* var. *mutica*; масла – у образцов *A. sativa* var. *aurea* и *A. sativa* var. *inermis*; глюканов, фенольных соединений, пальмитиновой кислоты, олеиновой – у голозерных образцов; линолевой кислоты и суммы ненасыщенных жирных кислот – у пленчатых образцов; суммы насыщенных жирных кислот и пальмитиновой кислоты – у всех изученных образцов; 2022 г. – для накопления масла, олеиновой кислоты – у *A. sativa* var. *mutica*; глюканов – у *A. sativa* var. *aurea*; ФВ, суммы ненасыщенных жирных кислот – у пленчатых образцов; крахмала у всех изученных образцов; 2023 г. – для накопления стеариновой кислоты – у пленчатых образцов; олеиновой, линоленовой – у *A. sativa* var. *aurea*; линолевой кислоты и суммы ненасыщенных жирных кислот – у голозерных образцов. Индекс ЖК отражал изменчивость жирнокислотного состава в масле образцов овса; самые высокие значения установлены в 2022 г. для пленчатых образцов, в 2023 г. – для голозерных. Величина АОА связана с присутствием веществ, способных нейтрализовать свободные радикалы. В 2022 г. максимальная АОА была отмечена у голозерных образцов, в 2023 г. – у пленчатых (см. Electronic Supplementary Materials, Suppl. 9).

По результатам статистической обработки (Electronic Supplementary Materials, Suppl. 20)[20] установлено, что образцы отдельных разновидностей овса, образцы репродукции разных лет, образцы одной разновидности и одного года репродукции имеют между собой достоверные различия по качественному составу зерновок. По источнику изменчивости «разновидность» достоверность отличий выявлена для всей совокупности биохимических признаков. По источнику «год репродукции» различия недостоверны по показателям АОА и линолевой кислоты. Специфическая реакция «разновидность – год репродукции» недостоверна по содержанию крахмала, масла и АОА.

Дискриминантный анализ

Построенные в ходе анализа дискриминантные функции в 2021 г. обеспечивали 97,5%, в 2022 г. – 98,9% и в 2023 г. – 97,2% правильных решений. Для 2021–2023 гг. изучения наиболее информативными показателями для различения разновидностей оказались содержание белка, крахмала, масла, β-глюканов, стеариновой и олеиновой жирных кислот, суммы ФВ и жирнокислотный индекс. В 2021 г. установлено влияние суммы ненасыщенных жирных кислот, в 2022 и 2023 г. – АОА. Влияние линоленовой кислоты в 2022 г. заменяется на линолевую, что, очевидно, связано с особенностями их биосинтеза. Структура канонических переменных отражена в приложении 21 (Electronic Supplementary Materials, Suppl. 21)[21]. По собственным значениям переменных каждая операционная единица (образец зерновок овса) занимает определенное место в пространстве канонических осей.

В 2021 г. по величине переменных Root 1 и Root 2 все образцы, взятые в исследование, разделились на отдельные группы в соответствии с принадлежностью к разновидностям овса (рис. 1, А). Левую среднюю часть графика занимают образцы *A. sativa* var. *inermis*, левую и правую нижнюю – *A. sativa* var. *aurea*, правую верхнюю – *A. sativa* var. *mutica*. В 2022 г. голозерные образцы var. *inermis* продолжают формировать отдельную группу, между *A. sativa* var. *aurea* и *A. sativa* var. *mutica* образуется «перешеек», где образец к-15701 (Kungs, Швеция, var. *mutica*) перешел в группу *A. sativa* var. *aurea*, а к-15805 (UFRGS 987015-2, Бразилия, var. *aurea*) – к *A. sativa* var. *mutica* (рис. 1, Б). В 2023 г. разделение разновидностей между собой становится более четким, кроме к-15777 (Elegant, Польша, var. *aurea*) и к-15705 (Prokop, Словакия, var. *aurea*), имеющих сходные биохимические показатели и создающих соприкосновение границ групп пленчатых образцов (рис. 1, В).

По величине двух канонических переменных в течение 2021–2023 гг. четко дифференцировалась только группа голозерных образцов, а пленчатые образцы груп-

версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 13. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2

[14] Приложение 14 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 14. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2

[15] Приложение 15 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 15. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2

[16] Приложение 16 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 16. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2

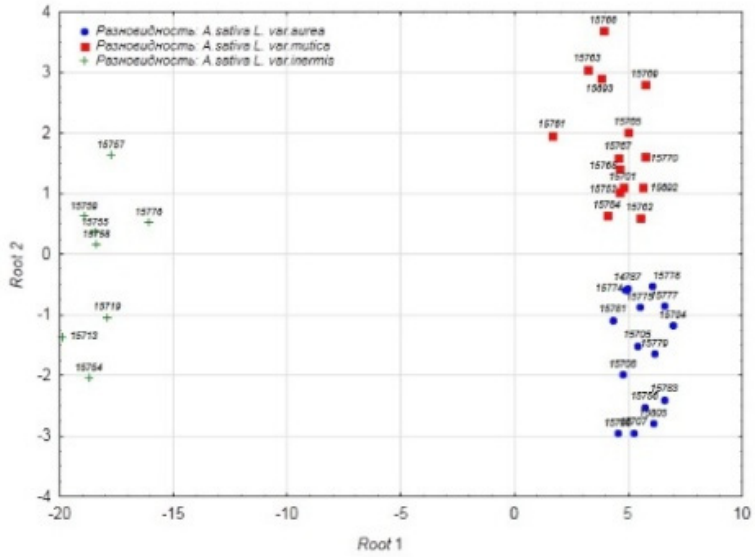
[17] Приложение 17 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 17. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2

[18] Приложение 18 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 18. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2

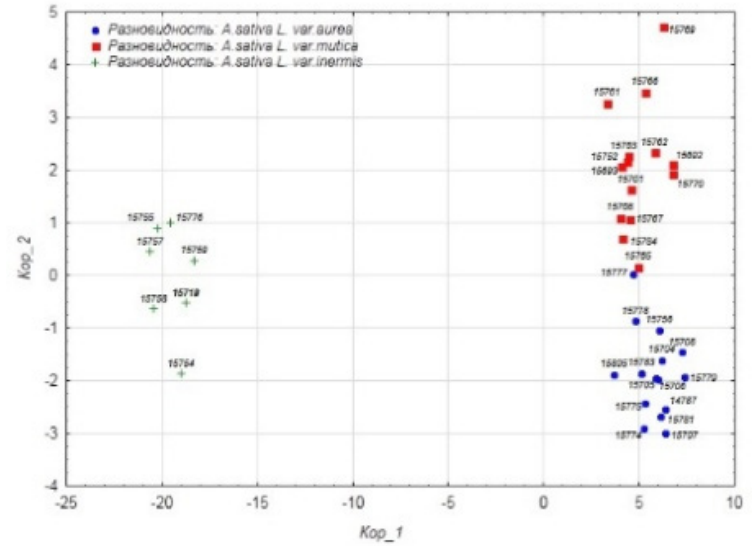
[19] Приложение 19 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 19. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2

[20] Приложение 20 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 20. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2

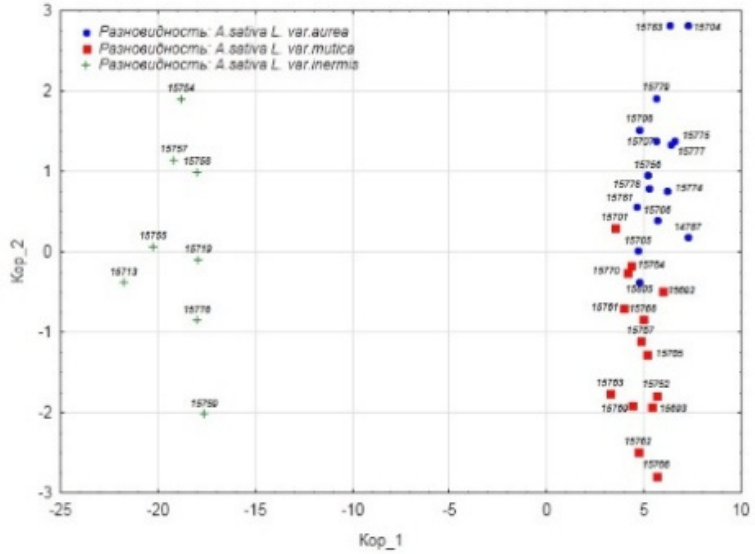
[21] Приложение 21 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 21. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2



А



Б



В

Рис. 1. Распределение образцов зерна разновидностей *Avena sativa* L. из коллекции VIR в пространстве двух канонических осей в 2021 г. (А), 2022 г. (Б) и 2023 г. (В)

Fig. 1. Distribution of the grain of *Avena sativa* L. varieties from the VIR collection in the space of two canonical axes in 2021 (A), 2022 (Б), and 2023 (В)

пировались только в 2021 г. (100% верных решений, ρ = 0,00). В 2022 г. 2 образца: к-15705 (Prokop, Словакия, var. *aurea*, ρ = 0,417) и к-15805 (UFRGS 987015-2, Бразилия, var. *aurea*, ρ = 0,241) вошли в состав *A. sativa* var. *aurea* и *A. sativa* var. *mutica* соответственно (86,7% правильных решений). В 2023 г. к-15777 (Elegant, Польша, var. *aurea*, ρ = 0,468) вошел в состав группы *A. sativa* var. *mutica* (93,3% правильных решений) (см. Electronic Supplementary Materials, Suppl. 21).

Факторный анализ выявил различие в факторной структуре варьирования в разные годы изучения. В 2021 г. выделились два фактора, в 2022 и 2023 гг. – по три фактора. Доля общей дисперсии факторов изменялась от 84,3% в 2021 г., 85,0% в 2022 г. до 87,0% в 2023 г. (Electronic Supplementary Materials, Suppl. 22[22], рис. 2). Влияние первого фактора было самым сильным в 2021 г., второго – в 2022 г., третьего – в 2023 г.

В 2021 г. первый фактор оказывал максимальное влияние на дисперсию образцов (59,0%). Он был положительно связан с накоплением белка (0,885), крахмала (0,929), масла (0,841), β-глюканов (0,800), суммы ФВ (0,823), АОА (0,725), пальмитиновой кислоты (0,803), линолевой кислоты (0,710), суммы насыщенных жирных кислот (0,743) и отрицательно – с накоплением олеиновой кислоты (–0,755), линоленовой кислоты (–0,875), суммы ненасыщенных жирных кислот (–0,743). В 2022 г. его влияние снизилось до 37,9%, а в составе осталось три признака – положительно связанные параметры масла (0,726) и глюканов (0,851) и отрицательно связанные параметры линоленовой кислоты (–0,910). В 2023 г. влияние первого фактора возросло (48,6), состав увеличился до восьми признаков: положительно связанные – масло (0,839), пальмитиновая кислота (0,863), линолевая кислота (0,766), сумма насыщенных жирных кислот (0,892); отрицательно связанные – олеиновая кислота (–0,814), линоленовая кислота (–0,818), сумма ненасыщенных жирных кислот (–0,892) и индекс жирных кислот (–0,903).

В 2021 г. на долю второго фактора приходилось 25,3% влияния на распределение образцов овса. Второй фактор отрицательно связан только с одним признаком – линоленовой жирной кислотой (–0,910). В 2022 г. его влияние усилилось (39,5%). В его состав вошло 5 положительно связанных с ним признаков: белок (0,730), глюканы (0,851), ФВ (0,833), пальмитиновая кислота (0,863), сумма насыщенных жирных кислот (0,748), а также 2 отрицательно связанных – сумма ненасыщенных жирных кислот (–0,748) и индекс жирных кислот (–0,737). В 2023 г. влияние второго фактора снизилось до 26,2%, в составе осталось три положительно связанных с ним признака – белок (0,756), глюканы (0,860), ФВ (0,794).

С 2022 г. факторная структура расширилась до трех, влияние третьего фактора в этом году было 7,6% и в 2023 г. выросло до 12,2%.

Третий фактор был отрицательно связан только со стеариновой кислотой (–0,958 в 2022 г. и –0,941 в 2023 г.) (см. Electronic Supplementary Materials, Suppl. 22).

На рисунке 2 (А–В) наглядно видно влияние первого фактора на четкое разделение голозерных образцов от *A. sativa* var. *aurea* и *A. sativa* var. *mutica*. Под влиянием второго и третьего фактора изменялась внутренняя структура группы голозерных образцов: более компактная в 2021 г. и «рыхлая» в 2022–2023 гг. Образцы *A. sativa* var. *aurea* и *A. sativa* var. *mutica* лучше всего были разделены между собой в 2021 г., хотя ряд образцов *A. sativa* var. *aurea* перешел в группу *A. sativa* var. *mutica*, факторные оси почти параллельны друг другу (рис. 2, А). В 2022 г. *A. sativa* var. *aurea* и *A. sativa* var. *mutica* представляют практически одну группу (факторные оси пересекаются) (см. рис. 2, Б). В 2023 г. скопление образцов *A. sativa* var. *aurea* и *A. sativa* var. *mutica* стало более «рыхлым», но их разделение между собой стало более четким несмотря на то, что факторные оси продолжают пересекаться (см. рис. 2, В).

Проведенный статистический анализ полученных данных показал, что голозерные образцы овса значительно отличаются от групп пленчатых разновидностей образцов. Группы пленчатых разновидностей имеют в целом достоверные различия между собой, но по результатам дискриминантного и факторного анализа часто образуют смешанную группу. Очевидно, это связано с тем, что var. *inermis* относится к голозерному подвиду овса посевного, а var. *aurea* и var. *mutica* – к пленчатому. Также было показано влияние года репродукции на качественный состав образцов зерновок разновидностей овса, что подтверждает зависимость качественного состава зерновок от погодных условий.

По результатам ***неспецифического метаболомного профилирования*** у всех изученных разновидностей выявлено 330 компонентов, из которых идентифицировано 146. Ряд веществ представлен несколькими пиками, в связи с особенностями взаимодействия бис(триметилсилил)ацетамида (N,O-Bis(trimethylsilyl)acetamide) (БСА) с молекулами анализируемой смеси веществ (Halket, Zaikin, 2003). Концентрация таких соединений определяется суммой всех пиков, имеющих одинаковую идентификацию. В результате количество соединений уменьшилось до 97, которые были объединены в 13 групп. В метаболомных профилях (МП) зерновок *A. sativa* var. *aurea* превалировали свободные аминокислоты (Electronic Supplementary Materials, Suppl. 23)[23], в том числе непротеиногенные, амины и амиды (Electronic Supplementary Materials, Suppl. 24)[24], олигосахара (Electronic Supplementary Materials, Suppl. 25)[25], производные сахаров (см. Electronic Supplementary Materials, Suppl. 23), парафины (Electronic Supplementary Materials, Suppl. 26)[26], фитостеролы (см. Electronic Supplementary Materials, Suppl. 23); у зерновок *A. sativa* var. *inermis* – свободные жирные кислоты (см. Electronic Supplementary Materials, Suppl. 24), спирты, кислоты; у зерновок *A. sativa* var. *mutica* – ацилглицеролы (Electronic Supplementary Materials,

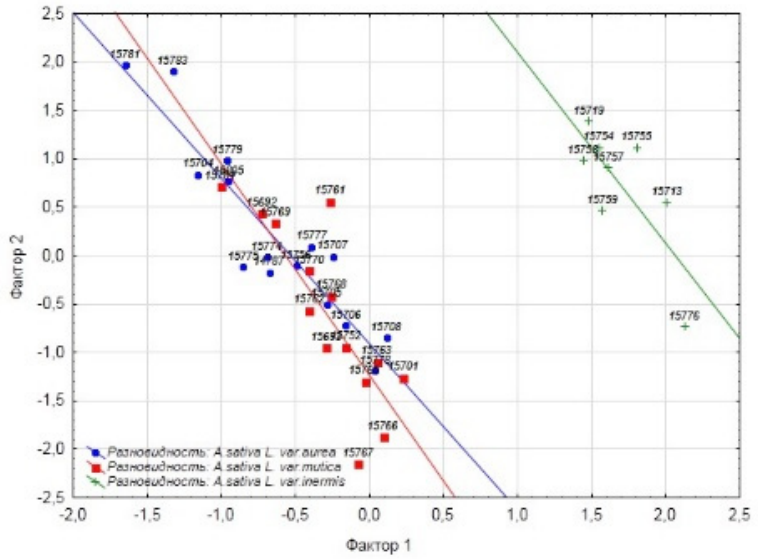
[22] Приложение 22 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 22. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2

[23] Приложение 23 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 23. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2

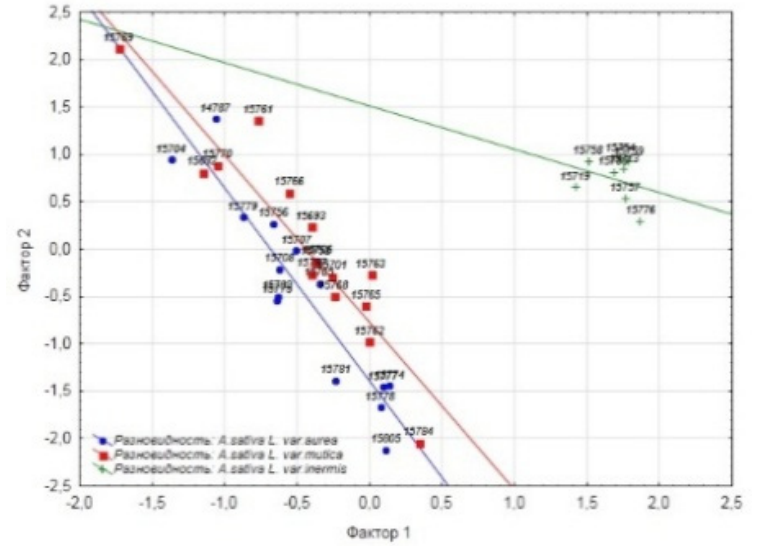
[24] Приложение 24 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 24. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2

[25] Приложение 25 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 25. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2

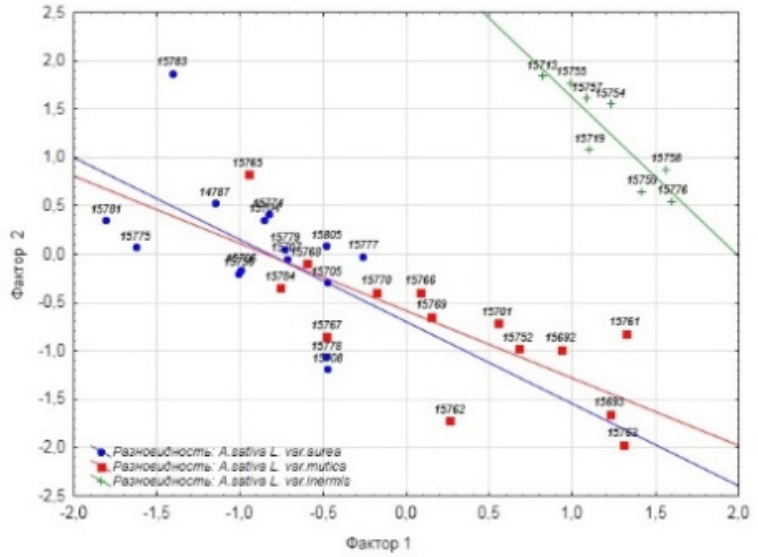
[26] Приложение 26 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 26. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2



А



Б



В

Рис. 2. Распределение образцов изученных разновидностей овса из коллекции ВИР в факторном пространстве признаков в 2021 г. (А), 2022 г. (Б) и 2023 г. (В)

Fig. 2. Distribution of the accessions of the studied oat varieties from the VIR collection in the factor space of characters in 2021 (A), 2022 (Б), and 2023 (В)

Suppl. 27)[27], моносахара (см. Electronic Supplementary Materials, Suppl. 23), фенолсодержащие соединения (см. Electronic Supplementary Materials, Suppl. 26, Electronic Supplementary Materials, Suppl. 28[28]). Достоверность отличий была подтверждена только для группы парафинов и моносахаров МП *A. sativa* var. *aurea* и *A. sativa* var. *inermis* соответственно (см. Electronic Supplementary Materials, Suppl. 26, Suppl. 28).

Однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) выявил группу метаболитов, содержание которых достоверно различается в МП, у всех изученных разновидностей овса. С высокой степенью достоверности ($p < 0,05$) МП отличаются по способности накапливать молочную, никотиновую, янтарную, кофейную, глутаминовую кислоты, α-аланин, триптофан, этаноламин, эйкозан; средней ($p < 0,1$) – валин, треонин, серин, миоинозитол и сумму парафинов (Electronic Supplementary Materials, Suppl. 29)[29]. Таким образом, зерновки разновидностей овса, различающиеся по наличию пленки и окраске цветковой чешуи (белой и желтой), также отличаются по интенсивности фотосинтеза, гликолиза, реакций цикла Кребса, синтеза молекул сигнальной системы растения и фитогормонов, метаболизму никотината и никотинамида, биосинтезу вторичных метаболитов, включая фенилпропаноиды, синтезу протеинов с определенным набором аминокислот, метаболизму глицерофосфолипидов, что влияет на возможность их адаптации к различным стрессам среды.

Заключение

Комплексное изучение образцов разновидностей овса посевного способствовало получению новых сведений об их химическом составе и влиянии абиотических факторов, выявлению закономерностей изменчивости признаков, отличий на уровне обменных процессов (накоплении отдельных и групп метаболитов). Исследование позволило выявить потенциальные возможности различных генотипов культурного овса, проследить за их биохимическими особенностями, выделить источники высокого содержания ценных для человека химических веществ.

Установлено, что образцы голозерного овса достоверно отличались высокими значениями белка, крахмала, масла, β-глюканов, АОА и суммы ФВ за весь период изучения. Данные, полученные для зерновок пленчатых разновидностей овса, были значительно ниже.

Факторный анализ показал достоверные различия в химическом составе зерновок, которые подтверждают морфологическую дифференциацию между пленчатым подвидом посевного овса (*A. sativa* subsp. *sativa*) и голозерным (*A. sativa* subsp. *nudisativa*).

Образцы изученных разновидностей, различающихся по наличию пленки и окраске цветковой чешуи (белой и желтой), согласно однофакторному дисперсионному анализу, показали достоверное отличие по интенсивности прохождения основных физиолого-биохимических процессов в зерновках овса посевного, что, по всей видимости, оказывает влияние на адаптацию к различным биотическим и абиотическим стрессорам.

Исследование позволило выявить потенциальные возможности различных генотипов культурного овса, проследить за их биохимическими особенностями, выделить источники высокого содержания:

– белка: var. *aurea* – к-15770 (13,43–14,01%), к-15781 (13,58–14,97%), к-15805 (14,90–15,03%); var. *mutica* – к-15765 (14,34–15,25%), к-15784 (14,32–15,63%); var. *inermis* – к-15759 (18,30–19,19%), к-15719 (18,24–21,09%); сорт-стандарт – 12,00–13,72%;

– крахмала: var. *aurea* – к-15705 (46,21–47,39%), к-15774 (45,65–47,92%), к-15779 (45,88–47,86%); var. *mutica* – к-15762 (45,12–46,97%), к-15784 (44,81–49,88%); var. *inermis* – к-15754 (57,97–61,90%), к-15776 (59,06–63,02%); стандарт – 40,24–45,83%;

– масла: var. *aurea* – к-15778 (5,05–5,38%); var. *mutica* – к-15762 (5,78–6,15%), к-15763 (5,63–5,85%); var. *inermis* – к-15713 (5,87–7,89%), к-15755 (6,0–8,31%), к-15776 (7,71–8,05%); стандарт – 4,62–5,36%;

– антиоксидантов: var. *aurea* – к-15756 (10,71–11,03 мг%); var. *mutica* – к-15693 (10,61–11,34 мг%); var. *inermis* – к-15713 (14,42–18,31 мг%), к-15754 (17,81–21,88 мг%); стандарт – 11,23–11,68 мг%;

– фенольных веществ: var. *aurea* – к-15707 (83,22–111,87 мг%); var. *mutica* – к-15761 (77,57–114,05 мг%); var. *inermis* – к-15719 (120,25–124,86 мг%); стандарт – 81,64–108,70 мг%;

– оптимального жирнокислотного состава масла: по соотношению линолевой кислоты к олеиновой к единице не приближается ни один образец. Наиболее близкие значения: var. *aurea* – к-15779 (1,3–1,7) и var. *mutica* – к-15784 (1,1–1,7);

– повышенного содержания β-глюканов, var. *aurea* – к-15779 (3,39–3,60%), к-15783 (3,23–3,68%); var. *mutica* – к-15784 (3,35–3,67%); var. *inermis* – к-15755 (4,14–5,03%);

– низкого содержания β-глюканов: var. *mutica* – к-15763 (2,68–2,96%); стандарт – 3,31–3,52%.

Данные образцы являются ценным исходным материалом для селекции современных районированных сортов овса и потенциальным сырьем для развития отечественного производства высококачественных кормов и продуктов питания разного направления.

References / Литература

365 Celsius. Exact forecasting and history. Weather in Pushkin (365 po Tselsiyu. Tochny prognoz i istoriya. Pogoda v Pushkine): [website]. [in Russian] (365 по Цельсию. Точный прогноз и история. Погода в Пушкине: [сайт]). URL: https://pogoda.365c.ru/russia/pushkin [дата обращения: 20.05.2025].

Abugalieva A.I., Loskutov I.G., Savin T.V., Chudinov V.A. Evaluation of naked oat accessions from the VIR collection for their qualitative characteristics in Kazakhstan. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021;182(1):9-21. [in Russian] (Абугалиева А.И., Лоскутов И.Г., Савин Т.В., Чудинов В.А. Изучение голозерного овса из коллекции ВИР на качественные показатели в условиях Казахстана. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2021;182(1):9-21). DOI: 10.30901/2227-8834-2021-1-9-21

[27] Приложение 27 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 27. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2

[28] Приложение 28 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 28. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2

[29] Приложение 29 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 29. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o2

Ahmet B., Ümit G., Musa Ö.M., Ziya D., Nurhan U. Oil contents and fatty acid composition of oat (*Avena sativa* L.) seed and oils. *Journal of Agroalimentary Processes and Technologies*. 2019;25(4):182-186.

Batalova G.A. Perspectives and results of naked oats breeding. *Legumes and Groat Crops.* 2014;2(10):64-69. [in Russian] (Баталова Г.А. Перспективы и результаты селекции голозерного овса. *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2014;2(10):64-69).

Brindzova L., Čertik M., Rapta P., Zalibera M., Mikulajová A., Takacsova M. Antioxidant activity, *β*-glucan and lipid contents of oat varieties. *Czech Journal of Food Sciences*. 2008;26(3):163-173. DOI: 10.17221/2564-CJFS

Chmelová D., Ondrejovič M., Havrlentova M., Hozlar P. Antioxidant activity in naked and hulled oat (*Avena sativa* L.) varieties. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*. 2015;4(3):63-65. DOI: 10.15414/jmbfs.2015.4.special3.63-65

Emmons C.L., Peterson D.M. Antioxidant activity and phenolic content of oat as affected by cultivar and location. *Crop Science*. 2001;41(6):1676-1681. DOI: 10.2135/cropsci2001.1676

Halket J.M., Zaikin V.G. Derivatization in mass spectrometry – 1. Silylation. *European Journal of Mass Spectrometry*. 2003;9(1):1-21. DOI: 10.1255/ejms.527

Heneen W.K., Banas A., Leonova S., Carlsson A.S., Marttila S., Debski H. et al. The distribution of oil in the oat grain. *Plant Signaling and Behavior*. 2009;4(1):55-56. DOI: 10.4161/psb.4.1.7313

Horeva V.I., Shelenga T.V., Blinova E.V., Konarev A.V., Loskutov I.G. Catalogue of the VIR global collection. Issue 876. Oats: biochemical characteristics of the accessions. St. Petersburg: VIR; 2018. [in Russian] (Хорева В.И., Шеленга Т.В., Блинова Е.В., Конарев А.В., Лоскутов И.Г. Каталог мировой коллекции ВИР. Выпуск 876. Овес: биохимическая характеристика образцов. Санкт-Петербург: ВИР; 2018).

Kozlova G.Ya., Akimova O.V. Comparative assessment of the bare-grained and filmy oats varieties on main parameters of corn quality. *Agricultural Biology*. 2009;44(5):87-89. [in Russian] (Козлова Г.Я., Акимова О.В. Сравнительная оценка голозерных и пленчатых сортов овса по основным показателям качества зерна. *Сельскохозяйственная биология*. 2009;44(5):87-89).

Krasilnikov V.N., Batalova G.A., Popov V.S., Sergeeva S.S. Fatty acid composition of lipids in naked oat grain of domestic varieties. *Russian Agricultural Sciences*. 2018;44(5):406-408. DOI: 10.3103/S1068367418050117

Loskutov I.G., Kovaleva O.N., Blinova E.V. (comp.). Guidelines for the study and preservation of the world collection of barley and oats (Metodicheskiye ukazaniya po izucheniyu i sokhraneniyu mirovoy kollektsii yachmenya i ovsa). I.G. Loskutov (ed.). 4th ed. St. Petersburg: VIR; 2012. [in Russian] (Методические указания по изучению и сохранению мировой коллекции ячменя и овса / сост. И.Г. Лоскутов, О.Н. Ковалева, Е.В. Блинова; под ред. И.Г. Лоскутова. 4-е изд. Санкт-Петербург: ВИР; 2012).

Loskutov I.G. Polonskiy V.I. Content of *β*-glucans in oat grain as a perspective direction of breeding for health products and fodder (review). *Agricultural Biology*. 2017;52(4);646-657. [in Russian] (Лоскутов И.Г., Полонский В.И. Селекция на содержание β-глюканов в зерне овса как перспективное направление для получения продуктов здорового питания, сырья и фуража. *Сельскохозяйственная биология*. 2017;52(4):646-657). DOI: 10.15389/agrobiology.2017.4.646rus

Manzoor M.S., Pasha I., Shehzad A., Zia M.A., Zhu M.J. Antioxidant profiling of indigenous oat cultivars with special reference to avenanthramides. *International Food Research Journal*. 2020;27(2):261-269.

Novikov N.N. Plant biochemistry (Biokhimiya rasteniy). Moscow; 2012. [in Russian] (Новиков Н. Н. Биохимия растений. Москва; 2012).

Papageorgiou M., Lakhdara N., Lazaridou A., Biliaderis C.G., Izydorczyk M.S. Water extractable (1→3,1→4)-β-D-glucans from barley and oats: An intervarietal study on their structural features and rheological behaviour. *Journal of Cereal Science*. 2005;42(2):213-224. DOI: 10.1016/j.jcs.2005.03.002

Peterson D.M., Wesenberg D.M., Burrup D.E., Erickson C.A. Relationships among agronomic traits and grain composition in oat genotypes grown in different environments. *Crop Science*. 2005;45(4):1249-1255. DOI: 10.2135/cropsci2004.0063

Pleshkov B.P. Biochemistry of agricultural plants (Biokhimiya selskokhozyaystvennykh rasteniy). Moscow: Agropromizdat; 1987. [in Russian] (Плешков Б.П. Биохимия сельскохозяйственных растений. Москва: Агропромиздат; 1987).

Polonskiy V.I., Surin N.A., Gerasimov S.A., Lipshin A.G., Sumina A.V., Zute S. The study of oat varieties (*Avena sativa* L.) of various geographical origin for grain quality and productivity. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2019;23(6):683-690. [in Russian] (Полонский В.И., Сурин Н.А., Герасимов С.А., Липшин А.Г., Сумина А.В., Зюте С. Изучение сортов овса (*Avena sativa* L.) различного географического происхождения по качеству зерна и продуктивности. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2019;23(6):683-690). DOI: 10.18699/VJ19.541

Popov V.S., Khoreva V.I., Konarev A.V., Shelenga T.V., Blinova E.V., Malyshev L.L. et al. Evaluating germplasm of cultivated oat species from the VIR collection under the Russian northwest conditions. *Plants (Basel)*. 2022;11(23):3280. DOI: 10.3390/plants11233280

Puzanskiy R., Tarakhovskaya E.R., Shavarda A., Shishova M. Metabolomic and physiological changes of *Chlamydomonas reinhardtii* (Chlorophyceae, Chlorophyta) during batch culture development. *Journal of Applied Phycology*. 2018;30(2):803-818. DOI: 10.1007/s10811-017-1326-9

Rodionova N.F., Soldatov V.N., Merezhko V.E., Yarosh N.P., Kobylyansky V.D. Flora of cultivated plants. Vol. 2, Pt. 3. Oat (Oves). V.D. Kobylyansky, V.N. Soldatov (eds). Moscow: Kolos; 1994. [in Russian] (Родионова Н.Ф., Солдатов В.Н., Мережко В.Е., Ярош Н.П., Кобылянский В.Д. Культурная флора. Т. 2, ч. 3. Овес / под ред. В.Д. Кобылянского, В.Н. Солдатова. Москва: Колос; 1994).

Samchenko O.N., Merkucheva M.A. Germinated seed – perspective raw material to develop new types of products. *Novy universitet. Seriya: tekhnicheskiye nauki = New University. Series: Engineering Sciences*. 2015;7-8(41-42):27-32. [in Russian] (Самченко О.Н. Меркучева М.А. Пророщенное зерно – перспективное сырье для разработки новых видов изделий. *Новый университет. Серия*: *технические науки*. 2015;7-8(41-42):27-32).

Seryakova L.P. Meteorological conditions and plants. A manual on agricultural meteorology (Meteorologicheskiye usloviya i rasteniya. Uchebnoye posobiye po agrometeorologii). Leningrad; 1971. [in Russian] (Серякова Л.П. Метеорологические условия и растения. Учебное пособие по агрометеорологии. Ленинград; 1971).

Shtark O.Y., Puzanskiy R.K., Avdeeva G.S., Yurkov A.P., Smolikova G.N., Yemelyanov V.V. et al. Metabolic alterations in

pea leaves during arbuscular mycorrhiza development. *PeerJ*. 2019;7:e7495. DOI: 10.7717/peerj.7495

Skryabin A.A., Froltsova I.N., Antipina A.A. Cultivated oat – a valuable cereal crop (Oves posevnoy – tsennaya zlakovaya kultura). *E-Scio*. 2020;8(47):282-290. [in Russian] (Скрябин А. А., Фрольцова И. Н., Антипина А. А. Овес посевной – ценная злаковая культура. *E-Scio*. 2020;8(47):282-290).

Urubkov S.A., Khovanskaya S.S., Dremina N.V., Smirnov S.O. Analysis of the chemical composition and nutritional value of grain raw materials for the production of baby foods. *Food Industry*. 2018;(8):16-20. [in Russian] (Урубков С.А., Хованская С.С., Дрёмина Н.В., Смирнов С.О. Анализ химического состава и пищевой ценности зернового сырья для производства продуктов детского питания. *Пищевая промышленность*. 2018;(8):16-20).

Wang Y., Frei M. Stressed food – the impact of abiotic environmental stresses on crop quality. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2011;141(3-4):271-286. DOI: 10.1016/j.agee.2011.03.017

Yashin A., Yashin Y., Fedina P., Chernousova N. Determination of natural antioxidants in cereal grains and bean cultures. *Analytics*. 2012;1(2):32-36. [in Russian] (Яшин А., Яшин Я., Федина П., Черноусова Н. Определение природных антиоксидантов в пищевых злаках и бобовых культурах. *Аналитика*. 2012;1(2):32-36).

Информация об авторах

Валентина Ивановна Хорева, 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, horeva43@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2762-2777

Татьяна Васильевна Шеленга, 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, tatianashelenga@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-3992-5353

Виталий Сергеевич Попов, кандидат технических 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, v.popov@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0003-3274-7662

Эльвира Эмильевна Сафонова, кандидат педагогических 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, e.safonova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-2199-3115

Елена Владимировна Блинова, кандидат сельскохозяйственных 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, e.blinova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-8898-4926

Леонид Леонидович Малышев, кандидат сельскохозяйственных 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.malyshev@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-8595-1336

Игорь Градиславович Лоскутов, доктор биологических наук, доцент, главный 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, i.loskutov@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-9250-7225

Information about the authors

Valentina I. Khoreva, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, horeva43@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2762-2777

Tatiana V. Shelenga, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, tatianashelenga@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-3992-5353

Vitaliy S. Popov, Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, v.popov@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0003-3274-7662

Elvira E. Safonova, Cand. Sci. (Pedagogy), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, e.safonova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-2199-3115

Elena V. Blinova, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, e.blinova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-8898-4926

Leonid L. Malyshev, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, l.malyshev@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-8595-1336

Igor G. Loskutov, Dr. Sci. (Biology), Associate Professor, Chief Researcher, Head of a Department, 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.org/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 20.06.2025; одобрена после рецензирования 15.09.2025; принята к публикации 20.10.2025.
The article was submitted on 20.06.2025; approved after reviewing on 15.09.2025; accepted for publication on 20.10.2025.

ГЕНЕТИКА КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 633.854.78
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o7

CC BY

Наследование в F_1 дефектности пыльцевых зерен и ее влияние на автофертильность растений подсолнечника

Я. Н. Демурин[1], О. А. Рубанова[1], А. В. Мелейчук[1], И. В. Киров[2], М. Ю. Казанцев[2]

[1] Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В.С. Пустовойта, Краснодар, Россия

[2] Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии, Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Яков Николаевич Демурин, genetic@vniimk.ru

Актуальность. Для генотипов подсолнечника с низким уровнем качества пыльцы отмечено снижение завязываемости семянок при самоопылении корзинок, что в свою очередь негативно сказывается на урожайности. Поэтому изучение качества пыльцевых зерен, в частности морфологической дефектности, является важной задачей в селекции гибридов подсолнечника.

Материалы и методы. Исследование проводили в 2022–2024 гг. на 2-ом отделении Центральной экспериментальной базы Всероссийского НИИ масличных культур имени В.С. Пустовойта (х. Октябрьский). В работе изучены линии ВК195, ВК305, КГ49 и RIL200, 10 гибридов F_1 и 23 растения M_0 линии ВК101. Проведена оценка качества пыльцы по форме и диаметру пыльцевых зерен. Определена автофертильность растений, которую рассчитывали как отношение числа выполненных семянок к количеству трубчатых цветков в корзинке.

Результаты. Скрещивание линий с контрастным проявлением дефектности пыльцы показало в F_1 в 8 случаях из 10 разные типы доминирования нормальной пыльцы. В двух скрещиваниях линии КГ49 с дефектностью пыльцы в качестве материнской формы с нормальными линиями ВК195 и ВК305 обнаружено промежуточное наследование признака. Значительная разница в величинах реципрокных скрещиваний указывает на материнский эффект в наследовании признака дефектности пыльцы у линии КГ49. Для линии ВК101 с нормальной пыльцой после экологического стресса по технологии TE-genesis наблюдали широкую изменчивость как дефектности пыльцы, так и автофертильности с отрицательной корреляцией между ними.

Заключение. Связь морфологической дефектности пыльцы с автофертильностью изучена в трех существенно различных вариантах: гомозиготности константных линий с контрастными значениями признаков, гетерозиготности межлинейных гибридов и средовой модификации эпигенетического стресса у нормальной линии. Во всех случаях установлена одинаковая закономерность снижения величины автофертильности при увеличении степени дефектности пыльцы.

Ключевые слова: дефектность пыльцы, завязываемость семянок, реципрокное скрещивание, самоопыление

Благодарности: данные исследования проведены в рамках выполнения работ при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-64-00076.

Для цитирования: Демурин Я.Н., Рубанова О.А., Мелейчук А.В., Киров И.В., Казанцев М.Ю. Наследование в F_1 дефектности пыльцевых зерен и ее влияние на автофертильность растений подсолнечника. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(1):180-189. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o7

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

© Демурин Я.Н., Рубанова О.А., Мелейчук А.В., Киров И.В., Казанцев М.Ю., 2026

GENETICS OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o7

Inheritance of defective pollen in F_1 and its effect on the self-fertility in sunflower

Yakov N. Demurin[1], Olga A. Rubanova[1], Anastasia V. Meleychuk[1], Ilya V. Kirov[2], Mikhail Yu. Kazantsev[2]

[1] *V.S. Pustovoit All-Russia Research Institute of Oil Crops, Krasnodar, Russia*

[2] *All-Russia Research institute of Agricultural Biotechnology, Moscow, Russia*

Corresponding author: Yakov N. Demurin, genetic@vniimk.ru

Background. A decrease in the seed setting rate during self-pollination of flower heads was observed in sunflower genotypes with low pollen quality, which, in its turn, negatively affected the yield. Therefore, studying the quality of pollen grains, in particular their morphological defectiveness, is important for sunflower hybrid breeding.
Materials and methods. The study was conducted in 2022–2024 at the 2nd Dept. of the Central Experiment Base (Oktyabrsky Farmstead), V.S. Pustovoit All-Russia Research Institute of Oil Crops. The VK195, VK305, KG49 and RIL200 lines, 10 F_1 hybrids, and 23 M_0 plants of the VK101 line were tested. Pollen quality was assessed according to the shape and diameter of pollen grains. Self-fertility was calculated as the ratio of the number of well-filled achenes to the number of tubular flowers in a head.
Results. Crossing lines with contrasting manifestations of pollen defectiveness showed different types of dominance for normal pollen in F_1 in 8 cases out of 10. Intermediate inheritance of the trait was found in two crosses of the pollen-defective KG49 line, used as the maternal form, with the normal VK195 and VK305 lines. A significant difference in the values of reciprocal crosses indicated a maternal effect in the inheritance of high pollen defectiveness in KG49. For VK101 with predominantly normal pollen, wide variability in both pollen defectiveness and self-fertility, with a negative correlation between them, was observed after environmental stress using the TE genesis technology.
Conclusion. The relationship between morphological defectiveness of pollen and self-fertility was analyzed in three significantly different variants: homozygosity of constant lines with contrasting values of traits, heterozygosity of interlinear hybrids, and environmental modification of epigenetic stress in a normal line. All variants demonstrated the same pattern of a decrease in self-fertility with an increase in pollen defectiveness.

Keywords: pollen defectiveness, seed setting, reciprocal crosses, selfing

Acknowledgments: this research was funded by the Russian Science Foundation (Grant No. 22-64-00076).

For citation: Demurin Ya.N., Rubanova O.A., Meleychuk A.V., Kirov I.V., Kazantsev M.Yu. Inheritance of defective pollen in F_1 and its effect on the self-fertility in sunflower. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(1):180-189. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o7

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Подсолнечник однолетний (*Helianthus annuus* L.) относится к перекрестноопыляемым энтомофильным видам растений. Ауткроссу способствуют такие факторы, как протерандрия трубчатых цветков, избирательность оплодотворения, аттрактивность к насекомым опылителям и генетическая система самонесовместимости (Bochkovoy et al., 2018). Самонесовместимость трубчатых цветков подсолнечника является спорофитной, однако ее неполнота позволяет получать самоопыленные линии данной культуры (Miller, Fick, 1997). Целенаправленный отбор на высокую автофертильность у культурного подсолнечника привел к повышению процента завязываемости семянок в корзинке при самоопылении (Gridnev, 2013). В исследовании селекционеров Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур имени В.С. Пустовойта (ВНИИМК) автофертильность варьировала у сортов от 3 до 15%, у линий от 12 до 60%, у гибридов от 26 до 61% (Bochkovoy et al., 2020). Самосовместимость современных гибридов может достигать 95% (Astiz et al., 2011), что в условиях недостатка опылителей может минимизировать снижение урожайности. Кроме того, на завязываемость семянок подсолнечника могут оказывать влияние погодные условия, особенно высокая температура и избыточная влажность воздуха во время микроспорогенеза, что может снизить количество нормальных пыльцевых зерен (Astiz, Hernández, 2013).

Мужская фертильность соцветий подсолнечника является важным селекционным признаком, требующим цитологической оценки (Voronova, Gavrilova, 2019). У культурного подсолнечника фертильность пыльцы может достигать 99%. При этом к нормальным пыльцевым зернам относят объекты преобладающего и слегка увеличенного размера с равномерно окрашенной цитоплазмой. Дефектными считают неокрашенные и неоднородно окрашенные пыльцевые зерна всех размеров со следами плазмолиза и сжатой цитоплазмой, а также окрашенные микропыльцевые зерна значительно меньшего размера (Voronova et al., 2024).

Американские исследователи установили, что диаметр пыльцевых зерен варьировал от 30 до 37 мкм, при этом у линий – закрепителей стерильности диаметр был достоверно больше на 1 мкм, чем у восстановителей фертильности (Prasifka et al., 2023). Изменчивость размера пыльцевых зерен является результатом нарушений мейотического деления в микроспорогенезе. Индийские ученые выявили следующие виды аномалий: образование мультивалентов, цитомиксис, слипание хромосом, асинхронное разъединение хромосом, отсутствие спаривания хромосом, слияние мейоцитов, аномалии в организации веретена деления и другие (Kaur, Singhal, 2019).

При изучении причин низкой урожайности гибрида подсолнечника Окси с измененным качеством масла (около 2,5 т/га в условиях конкурсного сортоиспытания) нами обнаружена связь высокой степени дефектных пыльцевых зерен и понижения завязываемости семянок. Так, для гибрида Окси и его материнской линии ВК876 Б отмечен значительный уровень дефектности пыльцевых зерен – 17 и 30% соответственно. При нанесении пыльцы гибрида Окси на ЦМС-тестер завязываемость семянок составила 44%, что на 25% ниже, чем у гибрида с низкой морфологической дефектностью пыльцы (3%) (Demurin, Rubanova, 2021).

Целью данной работы было определение влияния качества пыльцевых зерен на автофертильность растений у линий и гибридов культурного подсолнечника.

Материал и методы

Исследовательскую работу выполняли в период 2022–2024 гг. на экспериментальном поле 2-го отделения Центральной экспериментальной базы Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур имени В.С. Пустовойта (ЦЭБ ВНИИМК, х. Октябрьский) и в лаборатории генетики. Материалом послужили отобранные из коллекции четыре линии подсолнечника, имеющие отличия в качестве пыльцы: линии с дефектностью пыльцевых зерен – RIL200 и КГ49, а также нормальные линии – ВК195 и ВК305. Линии RIL200 и КГ49 являются образцами генетической коллекции, тогда как линии ВК195 и ВК305 относятся к отцовским формам коммерческих гибридов (рис. 1).

Данные линии участвовали в реципрокных скрещиваниях с использованием ручной кастрации для получения семян F_1 и изучения наследования качества пыльцы в потомстве первого поколения. В результате скрещивания родительских линий в различных комбинациях было получено 10 гибридов F_1:

max × min – RIL200 × ВК195, RIL200 × ВК305, КГ49 × ВК195 и КГ49 × ВК305;

min × max – ВК195 × RIL200, ВК305 × RIL200, ВК195 × КГ49 и ВК305 × КГ49;

min × min – ВК195 × ВК305 и ВК305 × ВК195.

Кроме того, изучены 23 выживших из 100 растений линии ВК101 поколения M_0 после последовательного



Рис. 1. Линии подсолнечника в фазу цветения

Fig. 1. Sunflower lines in the flowering phase

воздействия токсинов и температурного стресса на ранних этапах онтогенеза для активации ретротранспозонов в геноме по технологии TE-genesis (Thieme et al., 2017), проведенного во Всероссийском НИИ сельскохозяйственной биотехнологии (г. Москва).

Посев семян в полевых условиях осуществляли ручными сажалками по схеме 70 × 35 (40 000 растений/га); делянки однорядковые по 25 растений в каждом ряду.

В камерах фитотрона ВНИИМК в индивидуальных сосудах с торфогрунтом в весенний период 2023 г. выращивали растения M_0, а в осенне-зимний период 2023/2024 г. – четыре родительские линии для проведения гибридизации и получения семян F_1. Фотопериод составил 16 ч день / 8 ч ночь.

Изучали два морфологических признака – форму и размер пыльцевых зерен с оценкой степени дефектности пыльцы как отношения числа дефектных пыльцевых зерен (деформированных или с диаметром менее 30 мкм) к их общему числу, выраженного в процентах.

Степень доминирования признака рассчитана по формуле как соотношение h/d (Mather, Jinks, 1982). Статистическая обработка выполнена с помощью приложений ANOVA в Excel.

Результаты

За три года исследований максимальную дефектность пыльцы (65%) с минимальной автофертильностью (17%) имела линия КГ49. Наоборот, линия ВК195 характеризовалась минимальной дефектностью пыльцевых зерен (5%) и максимальной автофертильностью (49%). Для линии RIL200 была отмечена высокая дефектность на уровне 26% при автофертильности 39%. Линия ВК305 имела низкую дефектность – 7% и высокую автофертильность – 43%. Из полученных данных видно, что снижение качества пыльцевых зерен приводит к уменьшению завязываемости семянок при самоопылении корзинок подсолнечника (рис. 2).

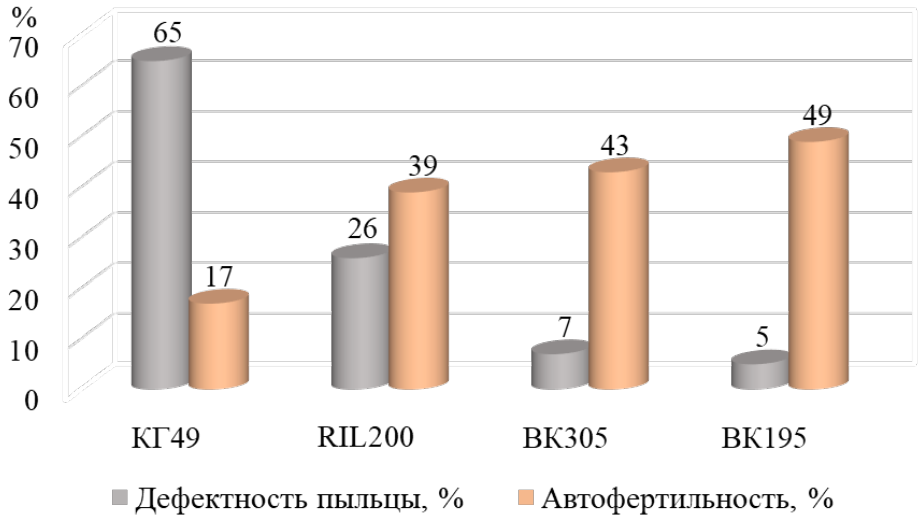


Рис. 2. Дефектность пыльцы и автофертильность линий подсолнечника

Fig. 2. Pollen defectiveness and self-fertility of sunflower lines

Кроме того, оценивали автофертильность растений, то есть относительное количество выполненных семянок при самоопылении корзинок подсолнечника.

К началу цветения растений проводили изоляцию корзинок перфорированными изоляторами из агроспанбонда. Пыльцу для исследования собирали индивидуально с каждого растения в бумажные пакеты (с 3–5 корзинок для линий и с трех корзинок для гибридов F_1). Для растений M_0 также проводили индивидуальный сбор пыльцы с корзинок. Для лучшей визуализации собранную пыльцу окрашивали в капле ацетоорсеина в течении трех минут, затем препарат микроскопировали с помощью цифрового микроскопа Биолаб TS-2000 LCD MC 20 (40×). Проводили измерение диаметра 100 пыльцевых зерен для одной корзинки, что позволило использовать данные параметры для оценки качества пыльцы.

После созревания корзинок подсолнечника, с которых проводили сбор пыльцы, их срезали и в лабораторных условиях индивидуально обмолачивали. Автофертильность растений определяли как отношение количества выполненных семянок в корзинке к числу трубчатых цветков, которые были отдельно собраны и посчитаны через 10–14 дней после цветения корзинок.

Нормальные пыльцевые зерна подсолнечника, как правило, характеризуются округлой формой с диаметром около 30–35 мкм. В основном дефектные пыльцевые зерна наблюдали двух типов: среднеразмерные, часто деформированные, с диаметром до 30 мкм и микропыльцевые зерна с диаметром до 10 мкм (рис. 3).

Например, в пыльце растения линии КГ49 отмечено 62% среднеразмерных, деформированных пыльцевых зерен и 2% микропыльцевых. Линия RIL200 характеризовалась наличием 24% среднеразмерных, деформированных пыльцевых зерен. В пыльце линий ВК305 и ВК195 были выявлены единичные деформированные пыльцевые зерна – 6 и 5% соответственно (рис. 4).

В восьми реципрокных скрещиваниях линий с максимальным и минимальным значениями дефектности пыльцы наблюдали: в четырех случаях наследование в F_1 – сверхдоминирование низкозначимого родителя (h/d = от –1,80 до –1,03), в двух случаях – промежуточное наследование (h/d = 0,29 и 0,33). В комбинациях RIL200 × ВК195 и ВК305 × RIL200 установлено неполное доминирование низкозначимого родителя (h/d = –0,64 и –0,60 соответственно) (табл. 1).

При реципрокном скрещивании min × min двух линий с минимальными значениями дефектности пыльцевых



Рис. 3. Пыльцевые зерна подсолнечника:
1 – нормальное; **2** – среднеразмерное, деформированное; **3** – микропыльцевое

Fig. 3. Sunflower pollen grains:
1 – normal; **2** – medium-sized, deformed; **3** – micropollen

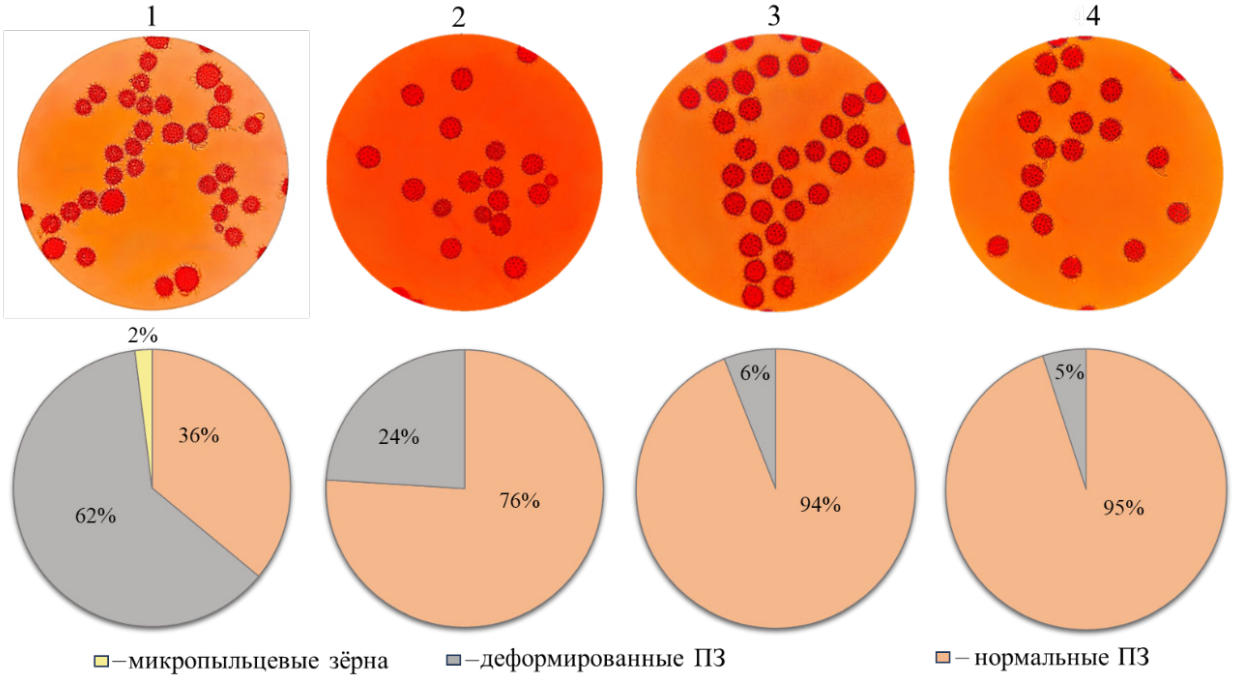


Рис. 4. Характеристика пыльцы растений линий подсолнечника: 1 – КГ49; **2** – RIL200; **3** – ВК305; **4** – ВК195

Fig. 4. Pollen characteristics of sunflower lines: 1 – KG49; **2** – RIL200; **3** – ВК305; **4** – ВК195

зерен в F_1 наблюдали наследование как сверхдоминирование низкозначимого родителя (h/d = –9,00 и –5,00) (см. табл. 1).

Автофертильность гибридов F_1 варьировала от 26 до 53% (рис. 5), хотя размах изменчивости меду отдельными корзинками был от 22 до 70% (рис. 6). Для комбинации КГ49 × ВК195 отмечена минимальная автофертильность – 26% при высокой дефектности пыльцы – 54%. Максимальным значением (53%) характеризовался гибрид ВК195 × RIL200 с низкой дефектностью пыльцевых зерен (2%). Среднее значение автофертильности составило 40%, с коэффициентом вариации CV = 22%. В комбинации КГ49 × ВК305 автофертильность была равной 41% при высокой дефектности – 56%. При этом между признаками дефектности пыльцевых зерен и автофертильности для 15 корзинок семи генотипов установлена достоверная отрицательная корреляция рангов Спирмена r_s = –0,64.

Далее изучили пыльцу 23 растений M_0 линии ВК101 после эпигенетического стресса по технологии TE-genesis. Средний диаметр пыльцевых зерен варьировал от 30 до 35 мкм. В пыльце растения № 2 были отмечены микропыльцевые зерна с диаметром 8 мкм. Два растения (№ 79 и № 134) имели макропыльцевые зерна с диаметром 40 мкм. Шесть растений характеризовались низким количеством дефектных пыльцевых зерен – от 3 до 6%. Для 14 растений установлена средняя дефектность пыльцы (от 10 до 22%), а для четырех – высокая (от 35 до 44%) (табл. 2).

Изученные растения показали варьирование диаметра корзинки от 2 до 8 см в условиях камеры фитотрона. Среднее значение составило 6 см при коэффициенте вариации CV = 30%.

Для растения № 110 отмечено минимальное число трубчатых цветков – 60 шт., тогда как растение № 58 имело максимальные показатели данного признака –

Таблица 1. Наследование дефектности пыльцы у гибридов F_1

Table 1. Inheritance of pollen defectiveness in F_1 hybrids

Тип скрещивания	Комбинация скрещивания	Дефектность, %			h/d	$НСР_{05}$
		P_1	P_2	F_1		
max × min	RIL200 × ВК195	16	5	7	–0,64	5
	RIL200 × ВК305	16	6	2	–1,80	4
	КГ49 × ВК195	81	5	54	0,29	6
	КГ49 × ВК305	81	6	56	0,33	7
min × max	ВК195 × RIL200	5	16	2	–1,55	5
	ВК305 × RIL200	6	16	8	–0,60	5
	ВК195 × КГ49	5	81	11	–0,84	7
	ВК305 × КГ49	6	81	5	–1,03	6
min × min	ВК195 × ВК305	5	6	1	–9,00	2
	ВК305 × ВК195	6	5	3	–5,00	3

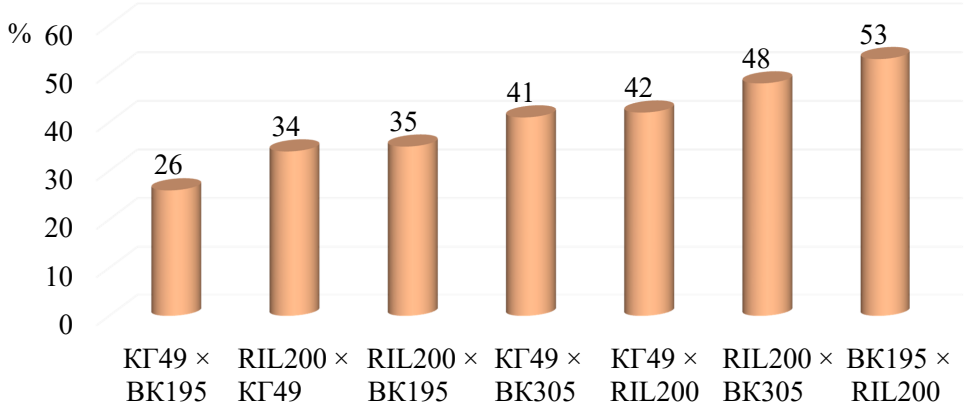


Рис. 5. Автофертильность гибридов подсолнечника в поколении F_1

Fig. 5. Self-fertility of sunflower hybrids in F_1

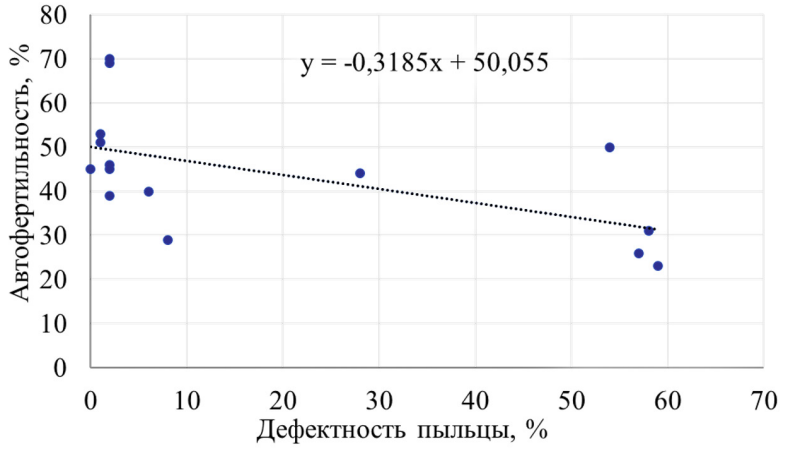


Рис. 6. Зависимость автофертильности корзинок гибридов F_1 от дефектности пыльцевых зерен

Fig. 6. Dependence of the self-fertility in F_1 hybrids on the defectiveness of pollen grains

Таблица 2. **Характеристика пыльцевых зерен растений M_0 линии ВК101**
Table 2. **Characteristics of pollen grains in M_0 plants of the VK101 line**

№ растения	Диаметр пыльцевого зерна, мкм			Дефектность пыльцы, %
	среднее	min	max	
91	35	28	38	3
61	32	25	38	4
45	33	28	35	5
76	34	13	38	5
95	34	28	38	5
80	34	15	38	6
59	33	25	38	10
60	34	25	38	10
57	33	13	38	11
58	35	28	38	11
79	33	13	40	11
81	31	13	35	11
90	33	15	38	13
98	34	28	38	13
106	33	25	38	13
105	32	25	35	15
109	32	25	35	15
93	31	25	35	17
110	32	25	35	19
134	33	23	40	22
29	31	25	38	38
133	30	13	35	39
56	30	23	35	44
среднее	33	22	37	15

266 шт. При этом среднее значение составило 127 цветков с размахом варьирования 206 шт. и коэффициентом вариации CV = 38% (табл. 3).

Число выполненных семянок M_1, полученных от самоопыления растений M_0, изменялось от 0 до 110 при среднем значении 35 шт. Размах варьирования составил 110 шт. с очень значительным коэффициентом вариации (CV = 97%).

Размах варьирования завязываемости семянок при самоопылении составил от 0 до 65% при среднем значении 27%. Коэффициент вариации также был очень высоким – 80%. Растение № 134 не завязало семян.

Между признаками дефектности пыльцевых зерен и автофертильности для растений M_0 установлена достоверная отрицательная корреляция рангов Спирмена $r_s = -0{,}70$ (рис. 7).

Обсуждение

Качество пыльцевых зерен является важной оценкой репродуктивной системы подсолнечника. От качества пыльцы зависит количество завязавшихся семянок в корзинке, особенно при инбридинге.

Вполне обосновано выделение трех классов по степени дефектности пыльцы. К первому классу относят растения, у которых степень дефектности пыльцы до 25%, то есть высокофертильные растения. Растения со средним показателем дефектности (от 25 до 50%) относят к группе среднефертильных, в пыльце которых увеличивается доля более мелких и, как правило, стерильных пыльцевых зерен. Растения, у которых показатель степени дефектности пыльцевых зерен более 50%, входят в третью группу низкофертильных, где пыльца имеет

Таблица 3. Характеристика соцветий растений M_0 линии ВК101
Table 3. Characteristics of inflorescences in M_0 plants of the VK101 line

№ растения	Диаметр корзинки, см	Количество трубчатых цветков в корзинке, шт.	Количество выполненных семянок M_1, шт.	Автофертильность, %
134	4	87	0	0
56	5	111	3	3
93	5	142	4	3
110	5	60	2	3
106	6	173	11	6
58	8	266	29	11
105	5	75	10	13
109	4	63	9	14
79	4	108	16	15
76	6	113	20	18
90	5	91	20	22
29	6	130	29	22
60	6	113	33	29
133	4	67	22	33
61	6	120	43	36
59	7	174	70	40
91	5	134	54	40
98	6	134	54	40
57	7	204	92	45
81	5	100	47	47
80	4	111	66	59
45	6	184	110	60
95	7	169	110	65
среднее	6	127	37	27

наибольшую изменчивость по диаметру (Voronova et al., 2024).

Отобранные нами ранее в ходе предварительного скрининга генетической коллекции четыре линии с контрастным проявлением признака дефектности пыльцы показали стабильное проявление признака за три года изучения, что подтверждает наследственный характер этих фенотипических различий.

Скрещивание отобранных линий между собой показало в F_1 в 8 случаях из 10 разные типы доминирования нормальной пыльцы, при этом в пяти случаях наблюдали эффект гетерозиса. Однако в двух скрещиваниях линии КГ49 в качестве материнской формы с нормальными линиями ВК195 и ВК305 неожиданно обнаружено промежуточное наследование признака, хотя другие реципрокные комбинации показали доминирование нормальной пыльцы. Значительная разница в величинах реципрокных скрещиваний указывает на материнский эффект в наследовании в F_1 признака высокой дефектности пыльцы у линии КГ49.

Отрицательное влияние морфологической дефектности пыльцы на физиологический признак семенной продуктивности при самоопылении представляется весьма парадоксальным. Например, если генотип входит в третью группу низкофертильных с долей дефектных пыльцевых зерен более 50%, то половина пыльцы представлена нормальными зернами, которых теоретически должно с избытком хватить для оплодотворения. По нашим подсчетам, на двух лопастях одного рыльца пестика с рабочей рецепторной поверхностью 1 мм^2 (2,0 × 0,5 мм) в один слой может контактно расположиться около четырех тысяч пыльцевых зерен с диаметром 30 мкм, а для оплодотворения необходим только один проросший мужской гаметофит. Остается открытым вопрос: каким образом дефектные зерна, сформировавшиеся в ходе нарушений микроспорогенеза, мешают процессу оплодотворения, поскольку так называемый эффект массы нормальной пыльцы для прорастания вполне достаточен.

Экспериментально доказано, что при нанесении пыльцы двух типов на две части одной ЦМС-корзинки подсолнечника (сплит-опыление) – высоко- и низкодефектной, в первом случае завязываемость гибридных семян была достоверно меньше на 25% (Demurin, Rubanova, 2021).

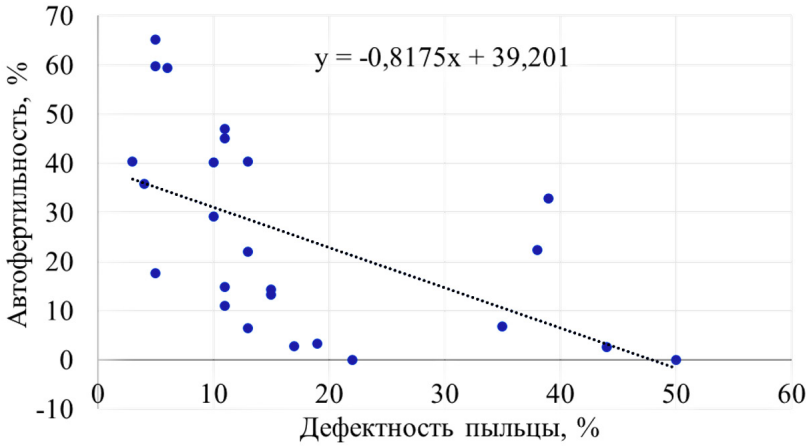


Рис. 7. Зависимость автофертильности растений M_0 от дефектности пыльцевых зерен

Fig. 7. Dependence of the self-fertility in M_0 plants on the defectiveness of pollen grains

В расщепляющейся популяции F_2 по гену *Rf1* на стерильной цитоплазме фертильные растения, но явно «слабо пылящие», обладали пониженной фертильностью и повышенной долей морфологически аномальных пыльцевых зерен (Karabitsina et al., 2019), что указывает на связь признака высокой дефектности с низкой пыльцевой продуктивностью.

Размах варьирования признака автофертильности, включая влияние генетической системы спорофитной самонесовместимости, у культурного подсолнечника может достигать значений от 0 до 96%. При этом автофертильность масличных образцов значительно выше кондитерских (Sun et al., 2012). Изучение самоопыленных растений беккроссного потомства от скрещивания дикорастущего и культурного подсолнечника также показало широкую изменчивость автофертильности – от 0 до 520 семян на корзинку (Gandhi et al., 2005).

Кроме того, у линии ВК101 с нормально низкой дефектностью пыльцы после эпигенетического стресса по технологии TE-genesis, то есть негативного воздействия экологического фактора, наблюдали широкую изменчивость как дефектности пыльцы, так и автофертильности с отрицательной корреляцией между ними.

Заключение

Связь морфологической дефектности пыльцы с автофертильностью изучена в трех существенно различных вариантах: гомозиготности константных линий с контрастными значениями признаков, гетерозиготности межлинейных гибридов и средовой модификации эпигенетического стресса у нормальной линии. Во всех случаях установлена одинаковая закономерность снижения величины автофертильности при увеличении степени дефектности пыльцы, что, очевидно, отражает общебиологическую репродуктивную закономерность, механизмы которой требуют дальнейшего исследования.

References / Литература

Astiz V., Hernández L.F. Pollen production in sunflower (*Helianthus annuus* L.) is affected by air temperature and relative humidity during early reproductive growth. *Phyton – International Journal of Experimental Botany*. 2013;82:297-302. DOI: 10.32604/phyton.2013.82.297

Astiz V., Iriarte L.A., Flemmer A., Hernández L.F. Self-compatibility in modern hybrids of sunflower (*Helianthus annuus* L.). Fruit set in open and self-pollinated (bag isolated) plants grown in two different locations. *Helia*. 2011;34(54):129-138. DOI: 10.2298/HEL1154129A

Bochkovoy A.D., Kamardin V.A., Nazarov D.A. About perspectives in selection of self-fertile biotypes during breeder and foundation seed growing of sunflower varieties. *Oil Crops*. 2020;1(181):3-11. [in Russian] (Бочковой А.Д., Камардин В.А., Назаров Д.А. О перспективах отбора самофертильных биотипов в звеньях первичного семеноводства сортов подсолнечника. *Масличные культуры*. 2020;1(181):3-11). DOI: 10.25230/2412-608X-2020-1-181-3-11

Bochkovoy A.D., Khatnyansky V.I., Kamardin V.A., Nazarov D.A. A role of selectivity of fertilization and self-fertility in breeding and seed-growing of sunflower (review). *Oil Crops*. 2018;1(173):94-104. [in Russian] (Бочковой А.Д., Хатнянский В.И., Камардин В.А., Назаров Д.А. Роль избирательности оплодотворения и самофертильности в селекции и семеноводстве подсолнечника (обзор). *Масличные культуры*. 2018;1(173):94-104). DOI: 10.25230/2412-608X-2018-1-173-94-104

Demurin Ya.N., Rubanova O.A. Pollen plant analysis of different sunflower genotypes. *Oil Crops*. 2021;2(186):10-17). [in Russian] (Демурин Я.Н., Рубанова О.А. Пыльцевой анализ растений различных генотипов подсолнечника. *Масличные культуры*. 2021;2(186):10-17). DOI: 10.25230/2412-608X-2021-2-186-10-17

Gandhi S.D., Heesacker A.F., Freeman C.A., Argyris J., Bradford K., Knapp S.J. The self-incompatibility locus (S) and quantitative trait loci for self-pollination and seed dormancy in sunflower. *Theoretical and Applied Genetics*. 2005;111(4):619-629. DOI: 10.1007/s00122-005-1934-7

Gridnev A.K. The possibilities of improving of sunflower lines by means of biotypes selection with high extent of quantitative traits in inbreeding. *Oil Crops*. 2013;1(153-154):31-35. [in Russian] (Гриднев А.К. Возможности улучшения линий подсолнечника отбором биотипов с высокой выраженностью количественных признаков при инбридинге. *Масличные культуры*. 2013;1(153-154):31-35).

Karabitsina Yu.I., Gavrilova V.A., Alpatieva N.V., Kuznetsova E.B., Anisimova I.N. Peculiarities of inheritance of pollen fertility restoration trait in sunflower with cytoplasmic male sterility. *Russian Journal of Genetics*. 2019;55(11):1375-1382. DOI: 10.1134/S1022795419110073

Kaur D., Singhal V.K. Meiotic abnormalities affect genetic constitution and pollen viability in dicots from Indian cold

deserts. *BMC Plant Biology*. 2019;19(1):10. DOI: 10.1186/s12870-018-1596-7

Mather K., Jinks J.L. Components of means: additive and dominance effects. In: K. Mather, J.L. Jinks (eds). *Biometrical Genetics*. 3rd ed. Boston, MA: Springer; 1982. p.65-81. DOI: 10.1007/978-1-4899-3406-2

Miller J.F., Fick G.N. Genetic of sunflower. In: A.A. Schneiter (ed.). *Agronomy Monographs. Vol. 35. Sunflower Technology and Production*. Madison, WI: American Society of Agronomy; 1997. p.441-495.

Prasifka J.R., Portlas Z.M., Hulke B.S. Pollen quantity, but not grain size, is correlated with floret size in cultivated sunflower, *Helianthus annuus* L. *Plant Genetic Resources: Characterization and Utilization*. 2023;21(3):269-273. DOI: 10.1017/S1479262123000709

Sun Y., Godwin I.D., Arief V.N., Delacy I.H., Lambrides C.J. Factors controlling self-fertility in sunflower: the role of GCA/SCA effects, S alleles, and floret characteristics. *Crop Science*. 2012;52(1):128-135. DOI: 10.2135/cropsci2011.04.0188

Thieme M., Lanciano S., Balzergue S., Daccord N., Mirouze M., Bucher E. Inhibition of RNA polymerase II allows controlled mobilization of retrotransposons for plant breeding. *Genome Biology*. 2017;18(1):134. DOI: 10.1186/s13059-017-1265-4

Voronova O.N., Gavrilova V.A. Quantitative and qualitative analysis of sunflower pollen (*Helianthus* L.) and its use in breeding work. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2019;180(1):95-104. [in Russian] (Воронова О.Н., Гаврилова В.А. Количественный и качественный анализ пыльцы подсолнечника (*Helianthus* L.) и его использование в селекционной работе. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2019;180(1):95-104). DOI: 10.30901/2227-8834-2019-1-95-104

Voronova O.N., Karabitsyna Yu.I., Alpatieva N.V., Gavrilova V.A., Anisimova I.N. Phenomenon of cytoplasmic male sterility in sunflower and possible causes of reduced seed setting in F_2 hybrids. *Bulletin of the State Nikita Botanical Gardens*. 2024;(153):97-106. [in Russian] (Воронова О.Н., Карабицина Ю.И., Алпатьева Н.В., Гаврилова В.А., Анисимова И.Н. Феномен цитоплазматической мужской стерильности у подсолнечника и возможные причины пониженной завязываемости семян в F_2 гибридов. *Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада*. 2024;(153):97-106).

Информация об авторах

Яков Николаевич Демурин, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В.С. Пустовойта, 350038 Россия, Краснодар, ул. Филатова, 17, genetic@vniimk.ru, https://orcid.org/0000-0003-3903-020X

Ольга Александровна Рубанова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В.С. Пустовойта, 350038 Россия, Краснодар, ул. Филатова, 17, olga.rubanova2017@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-6268-6544

Анастасия Владимировна Мелейчук, младший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В.С. Пустовойта, 350038 Россия, Краснодар, ул. Филатова, 17, epishkinaa1998@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-1618-6775

Илья Владимирович Киров, доктор биологических наук, заведующий лабораторией, Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии, 127550 Россия, Москва, ул. Тимирязевская, 42, kirovez@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3885-3837

Михаил Юрьевич Казанцев, лаборант-исследователь, Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии, 127550 Россия, Москва, ул. Тимирязевская, 42, miykazantsev@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-9696-1409

Information about the authors

Yakov N. Demurin, Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, V.S. Pustovoit All-Russia Research Institute of Oil Crops, 17 Filatova St., Krasnodar 350038, Russia, genetic@vniimk.ru, https://orcid.org/0000-0003-3903-020X

Olga A. Rubanova, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, V.S. Pustovoit All-Russia Research Institute of Oil Crops, 17 Filatova St., Krasnodar 350038, Russia, olga.rubanova2017@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-6268-6544

Anastasia V. Meleychuk, Associate Researcher, V.S. Pustovoit All-Russia Research Institute of Oil Crops, 17 Filatova St., Krasnodar 350038, Russia, epishkinaa1998@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-1618-6775

Ilya V. Kirov, Dr. Sci. (Biology), Head of a Laboratory, All-Russia Research Institute of Agricultural Biotechnology, 42 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russia, kirovez@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3885-3837

Mikhail Yu. Kazantsev, Laboratory Research Assistant, All-Russia Research Institute of Agricultural Biotechnology, 42 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russia, miykazantsev@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-9696-1409

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 23.09.2025; одобрена после рецензирования 14.11.2025; принята к публикации 14.01.2026.
The article was submitted on 23.09.2025; approved after reviewing on 14.11.2025; accepted for publication on 14.01.2026.

ГЕНЕТИКА КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Обзорная статья
УДК 633.1
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o3

CC BY

Применение полногеномного анализа ассоциаций для выявления маркеров, ассоциированных с хозяйственно ценными признаками овса

Н. А. Швачко, Т. В. Семилет, О. Н. Ковалева, К. А. Лукина, И. Г. Лоскутов

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

Автор, ответственный за переписку: Наталия Альбертовна Швачко, n.shvachko@vir.nw.ru

Успешное решение проблем селекции, связанных с увеличением продуктивности и улучшением качественных показателей зерна, возможно лишь при наличии соответствующего генотипированного исходного материала. Овес – зерновая культура универсального использования. Зерно овса имеет высокую питательную ценность, содержит незаменимые ненасыщенные жирные кислоты, основные минеральные элементы, глобулярные белки, β-глюканы и характеризуется наличием разнообразных химических веществ, проявляющих антиоксидантные свойства. В последнее время овес довольно широко используется на пищевые и диетические цели, для расширения ассортимента функциональных продуктов питания. Доказано, что продукты, получаемые из овса, являются средством профилактики и терапии некоторых хронических заболеваний. Большое значение приобретает выделение источников и создание доноров хозяйственно ценных признаков и тщательность изучения их компонентов. Полногеномный анализ ассоциаций (GWAS) – статистический метод, который позволяет идентифицировать геномные области, связанные с хозяйственно ценными признаками. Для применения данного анализа необходима информация о геноме объекта исследования, а также проведение фенотипирования в полевых условиях, как правило, в течение трех лет. В статье рассматривается использование GWAS для выявления маркеров, ассоциированных с основными агрономическими и биохимическими признаками. В публикации показаны возможности использования данного метода для анализа хозяйственно ценных признаков овса. Основное внимание уделено содержанию β-глюканов в зерновке и поиску маркеров, связанных с данным признаком, с применением метода GWAS.

Ключевые слова: *Avena sativa* L., GWAS, геном, секвенирование, гены, картирование, β-глюканы, селекция

Благодарности: исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда № 23-76-00005, https://rscf.ru/project/23-76-00005/.

Для цитирования: Швачко Н.А., Семилет Т.В., Ковалева О.Н., Лукина К.А., Лоскутов И.Г. Применение полногеномного анализа ассоциаций для выявления маркеров, ассоциированных с хозяйственно ценными признаками овса. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(1):190-203. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o3

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

© Швачко Н.А., Семилет Т.В., Ковалева О.Н., Лукина К.А., Лоскутов И.Г., 2026

GENETICS OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Review article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o3

Application of a genome-wide association study to identify markers associated with valuable agronomic traits in oats

Nataliya A. Shvachko, Tatyana V. Semilet, Olga N. Kovaleva, Kseniia A. Lukina, Igor G. Loskutov

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

Corresponding author: Nataliya A. Shvachko, n.shvachko@vir.nw.ru

Successful solution of plant breeding problems associated with higher crop productivity and improved quality indicators of grain is impossible without the availability of appropriate genotyped source material. Oat is a versatile cereal crop. Oat grain has high nutritional value, contains essential unsaturated fatty acids, essential minerals, globular proteins, and β-glucans; it is characterized by the presence of a diversity of chemical compounds with antioxidant properties. Recently, oats have been utilized quite widely for food and dietary purposes, to expand the range of functional food products. Products obtained from oats have been recognized as means of preventing and treating certain chronic diseases. Of great importance in this context is the identification and development of sources and donors of valuable agronomic traits and a thorough study of their components. The genome-wide association study (GWAS) is a popular genomic approach that identifies genomic regions associated with a phenotype and, thus, aims to discover mutations in the genes underlying the phenotype. Information about the genome of a studied object is required for this statistical method, as well as phenotyping under field conditions, usually over a period of three years. A discussion is presented on the use of GWAS in the analysis of crop genetic diversity. The results of using this technique for identification of main agronomic and biochemical traits are shown. The details of applying this analysis for oats, as well as for the identification of genes controlling the synthesis of β-glucans in oat grain, are considered.

Keywords: *Avena sativa* L., GWAS, genome, sequencing, genes, mapping, β-glucans, breeding

Acknowledgments: the study was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 23-76-00005, https://rscf.ru/project/23-76-00005/.

For citation: Shvachko N.A., Semilet T.V., Kovaleva O.N., Lukina K.A., Loskutov I.G. Application of a genome-wide association study to identify markers associated with valuable agronomic traits in oats. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(1):190-203. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o3

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Главным направлением селекции зерновых культур является увеличение продуктивности и улучшение качественных показателей зерна. При использовании классических методов селекции создание новых сортов может затянуться на десятки лет. Это связано с необходимостью подбора родительских пар, длительного изучения фенотипических признаков и поиска ассоциированных с ними аллельных вариантов генов. Однако зерновые культуры, в том числе и овес, имеют сложный геномный состав и являются тетра- и гексаплоидами. Поэтому поиск генов, ассоциированных с продуктивностью растений, может быть затруднен. Успешное ведение селекционного процесса и решение этих и вновь возникающих проблем возможно лишь при наличии соответствующего хорошо изученного и генотипированного исходного материала. Применение современных молекулярно-генетических и биоинформатических методов позволяет сократить селекционный процесс и создать новый сорт с заданными свойствами за достаточно короткое время.

Большое значение приобретает поиск генов, ассоциированных с хозяйственно ценными признаками, и создание на этой основе новых доноров с продуктивным фенотипом. Такие исследования в настоящее время довольно актуальны и проводятся с использованием различных молекулярно-генетических методов. Одним из таких методов является полногеномный анализ ассоциаций (genome-wide association study, GWAS).

GWAS – современный метод, позволяющий выявить взаимосвязь между фенотипом и генотипом организмов. Он дает возможность найти полиморфизм в геномных локусах, выявить ассоциации между однонуклеотидным полиморфизмом (SNP) и связанным с ним признаком (Gasparis, 2017). По сравнению с QTL-анализом двуродительских популяций, GWAS выявляет большее число новых геномных локусов (Pauli et al., 2014; Alqudah et al., 2019; Rozanova, Khlestkina, 2020). В настоящее время GWAS получил широкое распространение как метод, применяемый для изучения количественных признаков растений, особенно в связи с масштабным полногеномным секвенированием растительных объектов.

Применение GWAS в селекции зерновых культур

Обнаружение локусов количественных признаков (QTLs), контролирующих сложные признаки с последующим отбором, является распространенным подходом в селекции сельскохозяйственных растений. QTL-анализ (анализ локусов количественных признаков) основан на исследовании потомства от родителей, контрастных по изучаемому признаку (Jensen, 1989). Альтернативным подходом к обнаружению QTL является полногеномный анализ ассоциаций, который не требует проведения скрещиваний. Для данного метода можно использовать контрастный по изучаемым признакам генетический материал, например тот, который используется в селекционных программах. Применение GWAS позволяет выявлять ассоциации между генотипическими вариантами и фенотипическими изменениями. Метод GWAS основан на концепции неравновесного сцепления (linkage disequilibrium, LD) (Newell et al., 2011). Неравновесное сцепление представляет собой неслучайные ассоциации аллелей, которые коррелируют друг с другом. На LD влияет множество факторов: мутации, структура и смешение популяции, естественный и искусственный отбор, дрейф генов и репродуктивная биология, формирование выборки. Наиболее вероятная причина возникновения LD связана с появлением новых мутаций в организме, которые приводят к неслучайным ассоциациям с вариациями в других полиморфных локусах. Такое сцепление аллелей долго сохраняется между физически близкими локусами (тесно сцепленными локусами), это позволяет картировать мутации, связанные с ассоциациями искомых признаков (Montilla-Bascón et al., 2015; Single, Thomson, 2016). Сохранение такого сцепления связано с рекомбинацией, которая происходит случайным образом. Вероятность возникновения рекомбинации велика, если два сегмента ДНК расположены далеко друг от друга. Но если две последовательности расположены близко, то между ними будет редко происходить рекомбинация, и они будут оставаться вместе, то есть находиться в неравновесном сцеплении (Alghamdi, Padmanabhan, 2014). Анализ ассоциаций выполняют с применением метода линейной регрессии (фенотип – регрессор, генотип – предиктор) (Weller, 2018) с учетом структуры выборки. Число образцов должно быть достаточным, чтобы распределение значений признака в пределах выборки было нормальным или близким к нему. Выборка должна состоять из объектов одного вида, одного уровня плоидности, но быть разнородной, например из сортов или линий одного вида, но различного происхождения. В случае использования родственных генотипов появляется большое число ложноположительных SNP (Korte et al., 2012; Mohammadi et al., 2020). Поэтому перед проведением GWAS необходимо проанализировать структуру популяции. Помимо тестовой выборки необходимо сформировать и контрольную выборку. Исследуемые образцы фенотипируют, как правило, в течение трех лет и, желательно, на двух площадках в разных эколого-географических зонах – для минимизирования влияния окружающей среды и, соответственно, паратипической вариансы. Выявленные SNP возможно преобразовать в ДНК-маркеры, валидировать на независимой выборке и в дальнейшем рекомендовать для селекции (отбора селекционного материала).

В настоящее время полногеномный анализ ассоциаций активно применяется у растений, в том числе и зерновых культур, так как метод позволяет выявить значимые маркеры, связанные с хозяйственно ценными признаками, и использовать их в дальнейшем для ускоренной селекции. Исследователям удалось идентифицировать тысячи локусов, связанных с агрономическими, физиологическими признаками растений, включая качество и урожайность зерна, высоту растений и время цветения (Zhu et al., 2008; Tumino et al., 2017; Rispail et al., 2018; Canales et al., 2021; Shvachko et al., 2024). Проведение GWAS у культур – представителей трибы Triticeae, которые занимают обширные посевные площади на территории России, является актуальным для выявления локусов хозяйственно ценных признаков и адаптивности (Houston et al., 2013; Belcher et al., 2015; Shvachko et al., 2024).

Для выполнения GWAS необходимо иметь данные фенотипа и генотипа выборки растений. Генотипирование образцов проводят с применением различных методов: GBS-метод (genotyping-by-sequencing, генотипирование путем секвенирования), генотипирование с применением чипов SNP и DArT (Diversity Array Technology). Наиболее широко используемыми коммерческими микроматрицами являются Illumina BeadArrays и Affymetrix GeneChip. Чипы Axiom для овса пока не разработаны, но имеется чип Illumina, который содержит 6000 маркеров (6К)

(Tinker et al., 2014). Метод GBS – высокопроизводительного секвенирования – основан на технологии NGS (next-generation sequencing, технология секвенирования нового поколения) (Rasheed et al., 2017). Суть данного метода заключается в том, что геномная ДНК обрабатывается, как правило, двумя эндонуклеазами рестрикции и создается библиотека полученных фрагментов. Фрагменты секвенируют, получают короткие последовательности до 100 пар нуклеотидов, объединяют и выравнивают для получения SNP (Davey et al., 2011). Этот метод интересен тем, что его можно использовать как для объектов с секвенированным геномом, так и для тех, у которых еще не получен референсный геном.

Для выявления значимых маркеров в методе GWAS наиболее часто используют программное обеспечение Tassel (Bradbury et al., 2007) и/или программную платформу R (Endelman, 2011). Однако методов программного обеспечения, используемых в GWAS, имеется гораздо больше. К ним относятся следующие: PLINK (multipurpose GWAS toolset) (Purcell et al., 2007), Haploview (haplotype analysis with graphical interface) (Barrett et al., 2005), Quanto (sample size calculations), EMMAX (mixed model analysis) (Kang et al., 2010), GCTA (multipurpose GWAS toolset) (Yang et al., 2011), Structure (population structure inference based on structured association) (Pritchard et al., 2000), Eigenstrat (population structure inference based on PCA) (Price et al., 2006).

Особенности организации генома овса и признаки, актуальные для современной селекции

Овес (*Avena sativa* L., 2n = 6x = 42) – аллогексаплоид, включающий три различных субгенома: A, C и D, которые возникли в результате циклов полиплоидизации и межвидовой гибридизации. Геном овса отличается большим числом повторяющихся последовательностей, что усложняет генетическое изучение данного растения (Rodionov et al., 2020; Wang et al., 2023). Диплоидные виды имеют субгеномы AA или CC (с различными вариантами), тетраплоидные содержат геномы AABB или CCDD, все гексаплоидные виды, как и овес посевной (*A. sativa*), имеют геномный состав AACCDD (табл. 1). В настоящее время вопрос о происхождении и источниках этих геномов является дискуссионным (Loskutov, Rines, 2011). Впервые высококачественный референсный геном сорта 'Sang' овса посевного, содержащий 21 псевдохромосому, собран и опубликован только в 2022 г. (Kamal et al., 2022). Также секвенированы геномы диких видов диплоидного *A. longiglumis* Durieu и тетраплоидного *A. insularis* Ladiz., которые, предположительно, являются донорами субгеномов A, C и D для *A. sativa* (Kamal et al., 2022). Результаты полно-

Таблица 1. Система подрода *Avena* рода *Avena* L. (Loskutov, 2007; Loskutov et al., 2024)
Table 1. Speciation in the genus *Avena* L. (Loskutov, 2007; Loskutov et al., 2024)

Секция / Section	Виды / Species			Геном / Genome	2n
	Дикие / Wild		Культурные / Cultivated		
	Осыпающиеся цветками / Floret disarticulation	Осыпающиеся колосками / Spikelet disarticulation			
Aristulatae (Malzew) Losk.	*A. clauda* Durieu	*A. pilosa* M. B.		Cp	14
	A. longiglumis Durieu			Al	
	A. damascena Rajhathy et B.R. Baum			Ad	
	A. prostrata Ladiz.			Ap	
	A. wiestii Steud.	*A. atlantica* B.R. Baum & Fedak		As	
	A. hirtula Lagas.		*A. strigosa* Schreb.		
	A. barbata Pott. ex Link			AB	28
	A. vaviloviana (Malzew) Mordv.		*A. abyssinica* Hochst.		
Avena		*A. ventricosa* Balansa		Cv	14
		A. bruhnsiana Grun.			
		A. canariensis Baum		Ac	
		A. agadiriana B.R. Baum, Rajhathy & Fedak		AB	28
		A. magna B.R. Baum & Fedak		AC	
		A. murphyi Ladiz.			
		A. insularis Ladiz.		CD?	
	A. fatua L.	*A. sterilis* L.	*A. byzantina* K. Koch	ACD	42
	A. occidentalis Durieu	*A. ludoviciana* Durieu	*A. sativa* L.		

геномного секвенирования показали, что геном *A. sativa* имеет мозаичную структуру, отличающуюся от геномов других представителей семейства Poaceae Barnhart (Peng et al., 2022).

N. Kamal с соавторами (Kamal et al., 2022) установили, что два события транслокации были специфичны для *A. sativa*. При образовании гексаплоидного овса в субгеномы A и D были перераспределены не менее 226 Мб областей из субгенома C, что связано не с потерей отдельных генов, а с большим числом транслокаций. Мозаичная природа генома овса, вероятно, связана с отсутствием ортолога гена *TaZIP4-B2* (расположенного в локусе *Ph1*), который в мягкой пшенице стабилизирует структуру генома во время мейоза и подавляет кроссинговеры между гомеологичными хромосомами (Kamal et al., 2022). В 2022 г. секвенирован гексаплоидный геном голозерного сорта овса посевного 'Sanfensan' (*A. sativa* subsp. *nudisativa* (Husnot.) Rod. et Sold.), размер которого составил 10,76 Гб (Peng et al., 2022). Наличие видов с различной плоидностью и чужеродных интрогрессий у рода *Avena* L. является дополнительным барьером, препятствующим полноценному генетическому изучению овса посевного (Kamal et al., 2022). Полученные высококачественные референсные геномы диплоидных и тетраплоидных видов будут способствовать эффективному использованию генетических ресурсов зерновых культур для ускорения селекции овса (Peng et al., 2022).

В настоящее время селекционеров интересует создание адаптивных сортов, обладающих устойчивостью к полеганию и болезням, а также получение форм с высокой урожайностью и качеством зерна, с непродолжительным вегетационным периодом. Эти признаки являются количественными и характеризуются полигенным наследованием (Achleitner et al., 2008; Loskutov, Rines, 2011; Nadeem et al., 2017).

Селекционно ценные признаки

Одним из важных для селекции признаков является устойчивость к болезням. У восприимчивых сортов наблюдается снижение урожайности в среднем на 20–30%, а в случаях эпифитотий болезней растений возможна полная потеря урожая (Makarova et al., 2017). Наиболее серьезным заболеванием овса является корончатая ржавчина (возбудитель *Puccinia coronata* Corda), приводящая к значительному снижению урожайности и уменьшению массы 1000 зерен (Loskutov, Rines, 2011; Kapoor, Singh, 2020). В годы эпифитотий отмечается снижение урожайности до 80%. При раннем развитии болезни и условиях, благоприятных для развития патогена, происходит полная потеря урожайности (Dmitriev, 2000). Для создания генетической защиты овса от корончатой ржавчины чаще всего используют расоспецифическую ювенильную устойчивость, обеспечиваемую отдельными генами. Определение генетической архитектуры устойчивости овса затруднено из-за наличия уже более 100 аллелей *R*-генов устойчивости к корончатой ржавчине (*Pc*-гены) (Klos et al., 2017; Bakulina et al., 2022). Однако длительное использование устойчивых форм часто приводит к потере устойчивости, что связано с высокой скоростью мутирования патогенов. Поэтому некоторые гены устойчивости теряют свою эффективность (Ayliffe et al., 2008). В последнее время уделяют внимание частичной, или неспецифической, устойчивости. Неспецифический тип устойчивости не способен полностью защитить растение от поражения, но приводит к снижению числа и размера пустул на листьях и уменьшает спорообразование возбудителя заболевания. Неспецифическая устойчивость, в отличие от расоспецифической, контролируется полигенно и меньше всего зависит от изменений вирулентности возбудителя корончатой ржавчины, что позволяет растению дольше сохранять устойчивость (Winkler et al., 2016; Bakulina et al., 2022). Ранее уже выявили несколько генов устойчивости, которые были сопоставлены с расположением групп сцепления на основании картирования в двуродительских популяциях. К этим генам относятся *Pc38* и *Pc58a* в группе сцепления Mrg02, *Pc48* в Mrg20, *Pc68* в Mrg19, *Pc71* в Mrg21 (Klos et al., 2017) (табл. 2). В дальнейшем в исследованиях Y. Peng с соавторами изучили распределение *R*-генов, связанных с устойчивостью овса к корончатой ржавчине. Гены были картированы на хромосомах A1, A4, C4, D2 и D3 (рис. 1, а) (Peng et al., 2022). В 2022 г. было выполнено картирование групп сцепления Mrg на хромосомах овса (см. рис. 1, б).

В ряде исследований показаны возможности использования метода GWAS для поиска маркеров устойчивости к болезням. Для неспецифического типа устойчивости определены SNP-маркеры в Mrg08 и установлена их связь с геном устойчивости к корончатой ржавчине *Pc38* в группе сцепления Mrg02 на 70 сМ. В том же районе идентифицированы маркеры для определения устойчивости растений к возбудителю корончатой ржавчины и один маркер, связанный с продолжительностью цветения. Маркер, ассоциированный с потребностью растений к яровизации (ген *Vrn1*), находится в группе сцепления Mrg20 вместе с маркером гена *Pc48*, что указывает на связь между сроками цветения и устойчивостью к корончатой ржавчине. Эту связь можно объяснить влиянием стадии развития растения на восприимчивость к возбудителю заболевания (Winkler et al., 2016). Данный анализ используется также для идентификации локусов, связанных с полеганием овса. C.M. Zimmer с соавторами (Zimmer et al., 2018) сообщили о наличии в группах сцепления Mrg01, Mrg08, Mrg09, Mrg11, Mrg13 локусов, ассоциированных с высотой растений. В Mrg01 и Mrg13 выявленные маркеры совпали с QTL, контролирующими время колошения, а в Mrg11 соответствовали локусам, связанным с устойчивостью к заморозкам (Klos et al., 2016; Zimmer et al., 2018).

Другой важной задачей, которую решают селекционеры, является устойчивость к полеганию зерновых культур. Полегание приводит к снижению урожайности и качества зерна, а также к затруднениям при механической уборке. Степень устойчивости растений к полеганию зависит от условий окружающей среды, комплекса морфологических и биологических особенностей растения: корневой системы и силы ее сцепления с почвой, высоты, парусности метелки, а также прочности и гибкости соломины (Loskutov, Rines, 2011; Li et al., 2022; Moiseeva, Eremin, 2022). Считается, что с увеличением высоты растения возрастает риск полегания. Поэтому для решения проблемы полегания в селекции овса используют гены короткостебельности, такие как *Dw6* (*Dwarf*), приводящий к снижению высоты растения до 37%. Ген *Dw6* считается потенциальным эффективным ресурсом для выведения короткостебельных сортов с хорошей урожайностью, так как он оказывает наименьший плейотропный эффект на элементы продуктивности гибридных популяций (Yan et al., 2021). В то же время гены короткостебельности *Dw4* и *Dw7* оказывают негативное влияние на урожайность, увеличивая ригидность метелки, уменьшая размер зерновок, показатели массы

Таблица 2. **Гены, ассоциированные с селекционно ценными признаками овса**
Table 2. **Genes associated with oat traits important for breeding**

Название гена	Признак, контролируемый геном	Локализация на хромосоме	Ссылка
Pc38 и *Pc58a*	Неспецифическая устойчивость к корончатой ржавчине	7D	Klos et al., 2017
Pc48		4A	Klos et al., 2017
Pc68		3D	Klos et al., 2017
Pc71		4D	Klos et al., 2017
Pc91		1A	Peng et al., 2022
Pc98		4A	Peng et al., 2022
Pc39		4C	Peng et al., 2022
Pc45		2D	Peng et al., 2022
Pc53		3D	Peng et al., 2022
Dw6	Короткостебельность	6D	Yan, 2021
Dw4, *Dw7*, *Dw8*		*	Marshall, Murphy, 1981; Morikawa, 1989; Milach et al., 1997; Milach, Federizzi, 2001; Tinker et al., 2022
CslF семейство генов	Содержание β-глюкана	2A, 2C, 2D, 4C, 6A, 6C, 6D, 7A, 7C, 7D	Chawade et al., 2010; Sikora et al., 2013; Endelman, 2011
N1	Голозерность	4D	Boland, Lawes, 1973; Tumino et al., 2016 Yan et al., 2020
A.satnudSFS4D01G000045		4D	Peng et al., 2022

Примечание: * – гены не картированы, известны локусы, ассоциированные с высотой растения на хромосомах 2D, 4A, 4D, 6D, 7A, 7D
Note: * – genes are not mapped, loci associated with plant height are known on chromosomes 2D, 4A, 4D, 6D, 7A, and 7D

1000 зерен и другие компоненты урожайности (Marshall, Murphy, 1981). Впоследствии ген короткостебельности *Dw8* был идентифицирован у дикого гексаплоидного вида *A. fatua* L. (Morikawa, 1989), который при передаче его в высокорослый сорт 'Kanota' снижал высоту растений более чем на 50% (Milach et al., 1998) и не оказывал отрицательного эффекта на элементы урожайности (Loskutov, Rines, 2011).

В работах по картированию локусов генов *Dw6*, *Dw7* и *Dw8* было установлено, что все они тесно связаны между собой (Milach et al., 1997). Эти гены короткостебельности находятся на гомологичных хромосомах генома овса, в месте локализации некоторых наиболее эффективных аллелей генов устойчивости к корончатой и стеблевой ржавчинам (см. табл. 2). Предполагается использовать такие короткостебельные линии как формы с морфологическими маркерами устойчивости к болезням овса (Milach, Federizzi, 2001).

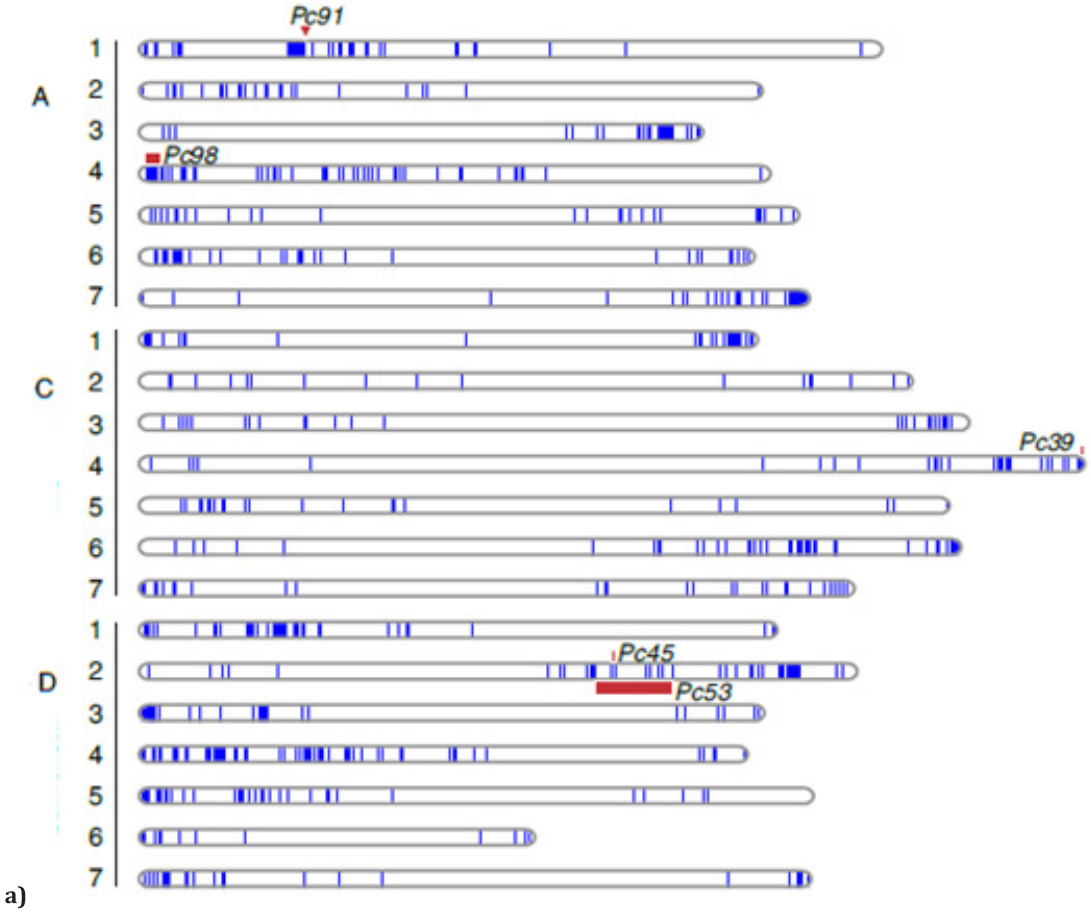
Актуальным остается поиск маркеров, ассоциированных с архитектоникой соцветия. Соцветие овса – метелка – существенно отличается по строению от других зерновых в трибе Triticeae. Остаются не до конца изученными взаимосвязи между фенотипом и локусами генов – модуляторов архитектоники метелки. С применением GWAS установлены геномные районы для длины метелки, размера и числа колосков на хромосомах 7A, 7D, 7C соответственно, что существенно дополнило данные о механизмах генетического контроля строения метелки овса (Carlson et al., 2023).

Биохимический состав зерновок

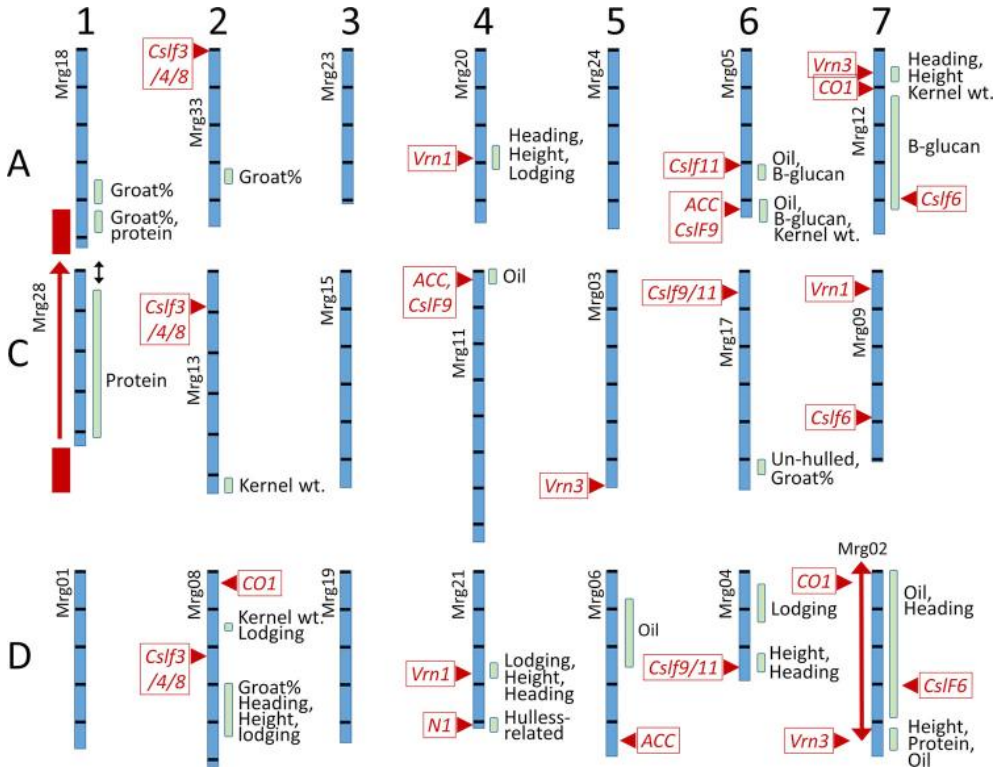
Помимо перечисленных направлений селекции овса для потребителя не менее важными являются биохимические свойства зерна. Зерно овса обладает высокой питательной ценностью, содержит ненасыщенные жирные кислоты, антиоксиданты, основные минеральные элементы и белки.

Остаются неизученными геномные районы, отвечающие за изменчивость содержания белка, крахмала, масла, ряда органических соединений, включая уроновые кислоты, которые, в свою очередь, непосредственно влияют на качество зерна. Селекция на улучшение биохимических показателей не столь успешна по сравнению с селекцией, направленной на повышение урожайности зерновых культур, так как хемотипирование, наряду с генотипированием, является затратной и довольно сложной задачей.

Выявлены ассоциации между генотипом и фенотипом сортов овса, определены локусы, связанные с содержанием отдельных жирных кислот, основными из кото-



а)



б)

Рис. 1. **а) Распределение *R*-генов на хромосомах геномов A, C и D овса (Peng et al., 2022); б) Схема расположения групп сцепления Mrg на хромосомах овса (Tinker et al., 2022)**

Fig. 1. **a) Genomic distribution of *R* genes on chromosomes in the A, C and D oat genomes (Peng et al., 2022); б) Diagram of the arrangement of Mrg linkage groups on oat chromosomes (Tinker et al., 2022)**

рых являются ненасыщенные олеиновые и линолевые жирные кислоты. M. O. Carlson с соавторами определили четыре локуса, которые способствуют изменению содержания и состава жирных кислот в зерне овса (Carlson et al., 2019).

Клеточные стенки эндосперма зерна овса содержат небольшое количество целлюлозы и состоят, как правило, из (1,3;1,4)-β-D-глюканов, которые относятся к высокомолекулярным углеводам растительного происхождения (рис. 2). Среди зерновых культур наибольшее содержание β-глюканов наблюдается в ячмене, особенно у голозерных форм (2–20 г на 100 г сухого веса), и овсе (3–8 г на 100 г сухого веса) (Loskutov, Polonskiy, 2017). Другие зерновые культуры также содержат β-глюканы, но в гораздо меньших количествах. Структура и физико-химические свойства полисахаридов клеточных стенок растений овса изучены, однако основные ферменты и гены, ассоциированные с синтезом β-глюканов, остаются малоизученными.

логическая составляющие (Redaelli et al., 2013). Интересно, что у многих диких видов овса обнаружили высокое содержание β-глюканов (до 6%) в зерновке (Miller et al., 1993; Leggett, 1996; Redaelli et al., 2013). Значение данного показателя в зерновке у большого эколого-географического разнообразия сортов колебалось от 3,3% до 6,2% (Loskutov, 2007; Loskutov, Rines, 2011; Loskutov, Polonskiy, 2017).

На сегодняшний день имеются лишь единичные работы по анализу ассоциаций между генотипом и фенотипом образцов овса с применением GWAS. Одна из самых ранних работ по поиску локусов, ассоциированных с содержанием β-глюкана у овса, была выполнена в 2012 г. (Newell et al., 2012).

При исследовании 115 селекционных линий овса с применением GWAS обнаружены локусы и гены-кандидаты, связанные с биосинтезом и регуляцией метаболитов. Идентификация этих показателей поможет направить дальнейшие усилия по повышению пищевой ценно-

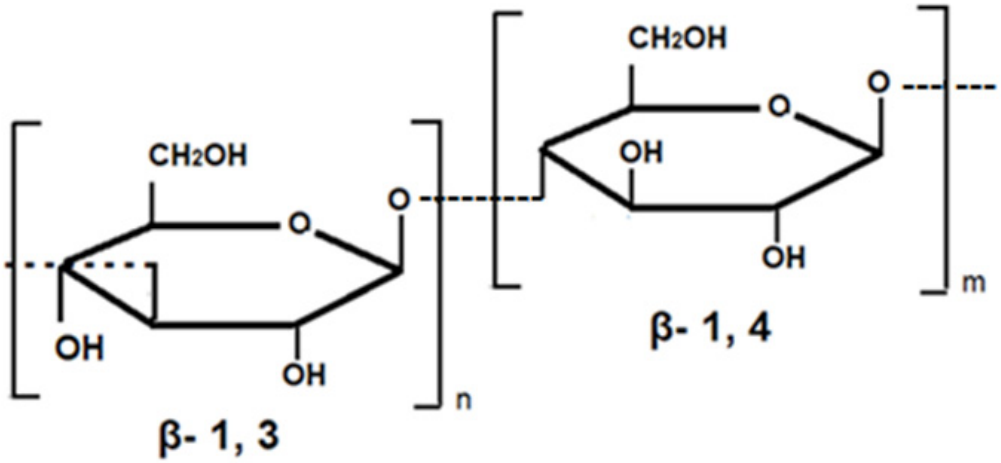


Рис. 2. Строение молекулы (1,3;1,4)-β-D-глюканов (Shvachko et al., 2021)

Fig. 2. Structure of the (1,3;1,4)-*β*-D-glucan molecule (Shvachko et al., 2021)

Состав пищевых волокон у различных видов зерновых культур генетически детерминирован. Это, по мнению исследователей, означает, что возможно создавать новые линии таких культур с различными соотношениями β-глюканов и арабиноксиланов (Brownlee, 2011). Изучение содержания β-глюканов у сортов культурного овса связано с его использованием в диетических целях и в медицинской промышленности (Toole et al., 2012). Бета-глюканы способны оказывать профилактическое и лечебное воздействие на организм человека: способствуют снижению риска сердечно-сосудистых заболеваний, поддержанию или понижению количества холестерина в крови и сокращают риск гипергликемического синдрома, улучшают функции печени и снижают избыточную массу тела (Valevskaya et al., 2017). Среди образцов овса выделены формы с минимальным содержанием глютена. Такие образцы могут быть использованы в селекционных программах при создании сортов овса для использования в безглютеновой и регулярной диете (Smuldersa et al., 2018). R. Redaelli с коллегами показали генетическое разнообразие европейских сортов овса по содержанию β-глюканов в зерновке. Содержание пищевых волокон в изученных сортах существенно различалось. На содержание β-глюканов в зерновке овса значительное влияние оказывали как генетическая, так и эко-

сти овса для здоровья желудочно-кишечного тракта человека (Bussler et al., 2017). Также с помощью QTL-анализа и GWAS были идентифицированы локусы, связанные с накоплением β-глюканов в зерне овса. Авторы генотипировали выборки озимого и ярового овса, выращенного в различных регионах Северной Америки (Kianian et al., 2000; Fogarty et al., 2020).

В отсутствие референсного генома овса место нахождения маркеров сравнивали с локализацией в группах сцепления Mrg. Были выполнены выделение ДНК, генотипирование путем секвенирования (GBS), определение полиморфизма отдельных нуклеотидов и фильтрация полученных SNP. Полногеномный анализ ассоциаций проведен в программной платформе R (Endelman, 2011). Использовалась смешанная линейная модель, учитывающая структуру популяции и матрицу родства. При помощи GWAS было выявлено несколько локусов, влияющих на содержание β-глюкана в овсе, расположенных в группах сцепления Mrg02, Mrg06, Mrg11, Mrg12, Mrg19 и Mrg20. В общей сложности исследован 431 образец овса в течение двух лет. Выборка генотипирована с использованием маркеров Diversity Array Technology (DArT). Структура популяции не играла большой роли в контроле ложноположительных результатов. Выявлены три независимых маркера, достоверно связанных с синтезом

β-глюкана. Значимые маркерные последовательности сравнивались с последовательностями риса. Одна из трех показала гомологию последовательностей с генами, локализованными на седьмой хромосоме риса, прилегающей к семейству генов *CslF*, которые кодируют β-глюксинтазы. Однако все еще остается открытым вопрос об идентификации генов, участвующих в биосинтезе β-глюканов зерновых культур (Chawade et al., 2010; Sikora et al., 2013; Shvachko et al., 2025).

Наличие окраски леммы повышает значимость овса для функционального питания человека. Окраска этой части зерновки в зависимости от содержания антоцианов может варьироваться и иметь цвет от белого до темно-коричневого, при том что наличие темноокрашенной леммы в некоторых случаях предполагает наличие антиоксидантов и в зерновке овса (Lukina et al., 2021). D. L. Hoffman определил полигенный контроль признака окраски цветковой чешуи у овса (Hoffman, 1999). G. Tumino с соавторами и L.R. Winkler с соавторами с помощью GWAS обнаружили значимый маркер в группе сцепления Mrg20 и затем картировали его на хромосоме 7D (Tumino et al., 2016; Winkler et al., 2016). Позднее представленные данные подтвердились, и было указано расположение маркера – 14.7 сМ. Кроме того, дополнительно выявили маркеры в группах сцепления Mrg17 и Mrg18, которые ассоциированы с окраской леммы (Wang et al., 2023).

Голозерность овса

В последнее время повышается интерес к голозерным сортам овса. Отличительная черта овса без пленки – это более высокое содержание незаменимых аминокислот, белка (до 20%) и жиров (до 7%). Такие характеристики вызывают у селекционеров интерес, связанный с получением зерна, пригодного для функционального питания (Ivanova et al., 2018). Голозерность и пленчатость овса – признак, определяющий, прежде всего, строение зерновки и содержание лигнина. У пленчатых форм пленки плотные и сложно удаляются при обмолоте, тогда как голозерные формы требуют меньше времени при обмолоте (Burrows et al., 2001). P. Boland и D. Lawes определили, что наличие пленок контролируется геном *N1* (Boland, Lawes, 1973). G. Tumino с соавторами выявили локусы, ассоциированные с данным признаком, расположенные в группе сцепления Mrg21 (178,3 сМ) (Tumino et al., 2016). При изучении небольшой популяции овса H. Yan с соавторами также выявили в группе сцепления Mrg21 значимые маркеры, ассоциированные с признаком голозерности овса (205,3 сМ, 212,1 сМ и 195,7 сМ) (Yan et al., 2020).

К настоящему времени создана первая генетическая карта голозерного овса (Song et al., 2015) и с применением GWAS обнаружены локусы и гены-кандидаты, ассоциированные с синтезом β-глюканов (Fogarty et al., 2020). Результаты показывают, что GWAS может быть успешно применен для обнаружения локусов, ассоциированных с хозяйственно важными признаками овса. В одной из недавних работ с помощью GWAS у образцов овса идентифицированы значимые маркеры для нескольких фенотипических признаков, в том числе и для признака голозерности, и определены их группы сцепления (Wang et al., 2023). Было проанализировано 4852 маркера SNP-чипа iSelect 6K BeadChip (Illumina, Сан-Диего, США) и проведен полногеномный анализ ассоциаций «генотип – фенотип». В результате анализа выявлено 6 SNP, ассоциированных с голозерностью зерновки овса. Они находились в нескольких группах сцепления: 4 SNP расположены в группе сцепления Mrg21 (194,0 и 205,7 сМ), 1 SNP – в Mrg05, 1 SNP – в группе Mrg09 (Wang et al., 2023). Y. Peng с соавторами с применением GWAS определили и ген-кандидат *A.satnudSFS4D01G000045*, ассоциированный с признаком голозерности овса, в локусе S4D 450955029 хромосомы 4D (рис. 3, см. табл. 2). Данный ген аннотирован как рецептороподобная киназа. В первом экзоне гена выявлен SNP (G/A), приводящий к замене аминокислоты аргинина на лизин (Peng et al., 2022).

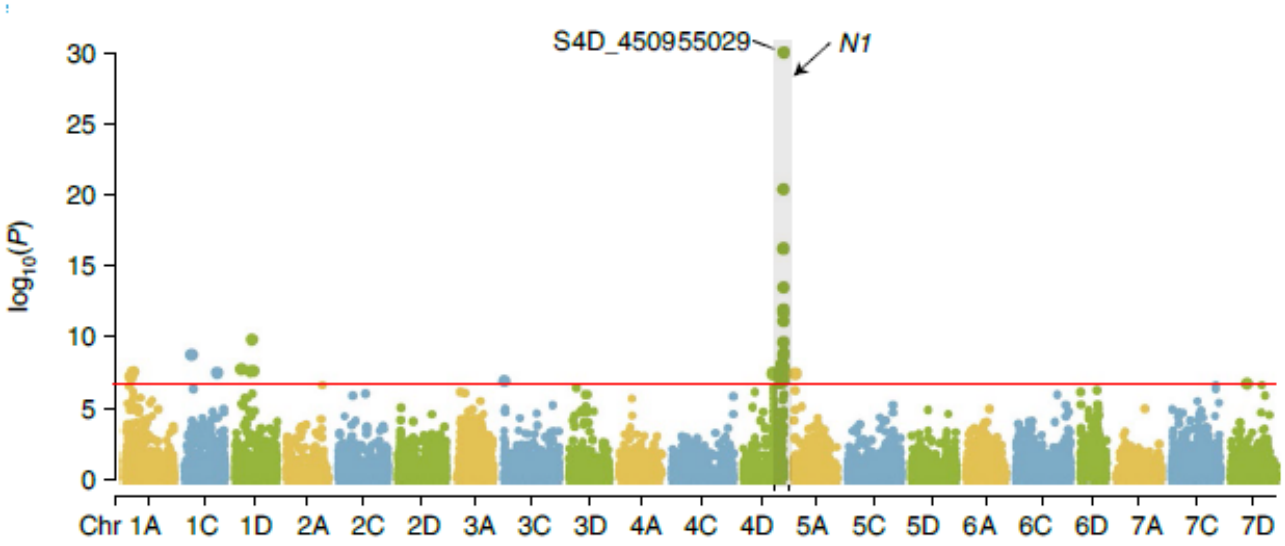


Рис. 3. Manhattan plot для признака голозерности овса. N1 – локус, ассоциированный с признаком голозерности; красная линия – порог значимости, скорректированный по Бонферрони (–log10 P = 6,70) (Peng et al., 2022)

Fig. 3. Manhattan plot for the nakedness trait in oats. N1 is the locus associated with the nakedness trait; the red line is the Bonferroni-corrected significance threshold (–log10 P = 6.70) (Peng et al., 2022)

Заключение

Для ускоренной селекции зерновых культур, обладающих повышенной питательной ценностью и антиоксидантной активностью, необходим скрининг перспективных сортов и гибридов по содержанию широкого спектра биохимических показателей в зерне. Результаты изучения уже полученных и успешное создание новых продуктивных и высококачественных сортов, богатых биохимическими компонентами различной природы, позволят использовать их для получения целого спектра функциональных продуктов, оказывающих благоприятное влияние на организм человека. В настоящее время тенденция изучения коллекционных образцов овса по содержанию важных биохимических компонентов является наиболее перспективной и приводит к выявлению интересного нового исходного материала для дальнейшей селекции.

Полногеномный анализ ассоциаций успешно применен для исследования овса по различным хозяйственно важным признакам. Прежде всего, GWAS способствует выявлению новых локусов для ускоренной селекции и созданию новых высокоурожайных сортов, устойчивых к болезням и отличающихся биохимическим составом зерновок, полезных для диетического и функционального питания. В настоящее время у овса с помощью GWAS найдены молекулярные маркеры, связанные с содержанием β-глюканов (Zimmer et al., 2020, 2021), устойчивостью к корончатой ржавчине (Klos et al., 2017), голозерностью (Yan et al., 2020), продолжительностью периода «всходы – выметывание» (Bekele et al., 2018). Эти исследования подтвердили ранее выявленные QTL и идентифицировали новые локусы (Yan et al., 2023).

Таким образом, GWAS позволяет выявлять новые маркеры, ассоциированные с основными хозяйственно ценными признаками овса. Данный метод является ценным инструментом генетического анализа для выявления полиморфизма, определения локусов, ассоциированных с признаками, и дальнейшей идентификации генов-кандидатов. Полученные данные можно использовать в селекционных программах для повышения адаптивности, создания урожайных сортов с высоким качеством зерна. Из-за сложности организации генома овса использование полногеномного анализа ассоциаций поможет решить проблему поиска генов-кандидатов для маркер-ориентированной селекции и получения сортов с заданными свойствами.

References / Литература

Achleitner A., Tinker N.A., Zechner E., Buerstmayr H. Genetic diversity among oat varieties of worldwide origin and associations of AFLP markers with quantitative traits. *Theoretical and Applied Genetics*. 2008;117(7):1041-1053. DOI: 10.1007/s00122-008-0843-y

Alghamdi J., Padmanabhan S. Fundamentals of complex trait genetics and association studies. In: S. Padmanabhan (ed.). *Handbook of Pharmacogenomics and Stratified Medicine*. London: Academic Press; 2014. p.235-257. DOI: 10.1016/B978-0-12-386882-4.00012-8

Alqudah A.M., Sallam A., Baenziger P.S., Börner A. GWAS: Fast-forwarding gene identification and characterization in temperate Cereals: lessons from Barley – A review. *Journal of Advanced Research*. 2020;22:119-135. DOI: 10.1016/j.jare.2019.10.013

Ayliffe M., Singh R., Lagudah E. Durable resistance to wheat stem rust needed. *Current Opinion in Plant Biology*. 2008;11(2):187-192. DOI: 10.1016/j.pbi.2008.02.001

Bakulina A.V., Novoselova N.V., Savintseva L.S., Batalova G.A. DNA markers in oat breeding for crown rust resistance (a review). *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2022;183(1):224-235. [in Russian] (Бакулина А.В., Новоселова Н.В., Савинцева Л.С., Баталова Г.А. ДНК-маркеры в селекции овса на устойчивость к корончатой ржавчине (обзор). *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2022;183(1):224-235). DOI: 10.30901/2227-8834-2022-1-224-235

Barrett J.C., Fry B., Maller J., Daly M.J. Haploview: analysis and visualization of LD and haplotype maps. *Bioinformatics*. 2005;21(2):263-265. DOI: 10.1093/bioinformatics/bth457

Bekele W.A., Wight C.P., Chao S., Howarth C.J., Tinker N.A. Haplotype-based genotyping-by-sequencing in oat genome research. *Plant Biotechnology Journal*. 2018;16(8):1452-1463. DOI: 10.1111/pbi.12888

Belcher A.R., Graebner R.C., Cuesta-Marcos A., Fisk S., Filichkin T., Smith K.P. et al. Registration of the TCAP FAC-WIN6 barley panel for genomewide association studies. *Journal of Plant Registrations*. 2015;9(3):411-418. DOI: 10.3198/jpr2014.12.0083crmp

Boland P., Lawes D.A. The inheritance of the naked grain character in oats studied in a cross between the naked variety caesar and the husked variety BO 1/11. *Euphytica*. 1973;22(3):582-591. DOI: 10.1007/BF00036659

Bradbury P.J., Zhang Z., Kroon D.E., Casstevens T.M., Ramdoss Y., Buckler E.S. TASSEL: software for association mapping of complex traits in diverse samples. *Bioinformatics.* 2007;23(19):2633-2635. DOI: 10.1093/bioinformatics/btm308

Brownlee I.A. The physiological roles of dietary fiber. *Food Hydrocolloids*. 2011;25(2):238-250. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2009.11.013

Burrows V.D., Molnar S.J., Tinker N.A., Marder T., Butler G., Lybaert A. Groat yield of naked and covered oat. *Canadian Journal of Plant Science*. 2001;81(4):727-729. DOI: 10.4141/P00-181

Bussler W.W., Dezego K., Bowen M. Buige A., Esposito D., Lila M.A., Komarnytsky S. Health modifying regions in the oat (*Avena sativa*) genome responsible for beneficial effects on immune and gastrointestinal health. *The FASEB Journal*. 2017;31(S1):437.7. DOI: 10.1096/fasebj.31.1_supplement.437.7

Canales F.J., Montilla-Bascón G., Bekele W.A., Howarth C.J., Langdon T., Rispail N. et al. Population genomics of Mediterranean oat (*A. sativa*) reveals high genetic diversity and three loci for heading date. *Theoretical and Applied Genetics*. 2021;134(7):2063-2077. DOI: 10.1007/s00122-021-03805-2

Carlson C.H., Fiedler J.D., Naraghi S.M., Nazareno E.S., Ardayfio N.K., McMullen M.S. et al. Archetypes of inflorescence: genome-wide association networks of panicle morphometric, growth, and disease variables in a multiparent oat population. *Genetics*. 2023;223(2):iyak128. DOI: 10.1093/genetics/iyac128

Carlson M.O., Montilla-Bascón G., Hoekenga O.A., Tinker N.A., Poland J., Baseggio M. et al. Multivariate genome-wide association analyses reveal the genetic basis of seed fatty acid composition in oat (*Avena sativa* L.). *G3 – Genes Genomes Genetics*. 2019;9(9):2963-2975. DOI: 10.1534/g3.119.400228

Chawade A., Sikora P., Bräutigam M., Larsson M., Vivekanand V., Nakash M.A. et al. Development and characterization of an oat TILLING-population and identification of mutations in

lignin and beta-glucan biosynthesis genes. *BMC Plant Biology*. 2010;10(1):86. DOI: 10.1186/1471-2229-10-86

Davey J.W., Hohenlohe P.A., Etter P.D., Boone J.Q., Catchen J.M., Blaxter M.L. Genome-wide genetic marker discovery and genotyping using next-generation sequencing. *Nature Reviews. Genetics*. 2011;12(7):499-510. DOI: 10.1038/nrg3012

Dmitriev A.P. Oat rust (Rzhavchina ovsa). St. Petersburg: VIZR; 2000. [in Russian] (Дмитриев А.П. Ржавчина овса. Санкт-Петербург: ВИЗР; 2000).

Endelman J.B. New algorithm improves fine structure of the barley consensus SNP map. *BMC Genomics*. 2011;12:407. DOI: 10.1186/1471-2164-12-407

Fogarty M.C., Smith S.M., Sheridan J.L., Hu G., Islamovic I., Reid R. et al. Identification of mixed linkage β-glucan quantitative trait loci and evaluation of *AsCslF6* homoeologs in hexaploid oat. *Crop Science*. 2020;60(2):914-933. DOI: 10.1002/csc2.20015

Gasparis S. (ed.). Methods in molecular biology. Vol. 1536. Oat: methods and protocols. Clifton, NJ: Humana Press; 2017. DOI: 10.1007/978-1-4939-6682-0

Geng X., Zhi D., Liu Z. Genome-wide association studies of performance traits. In: Z. Liu (ed.). *Bioinformatics in Aquaculture: Principles and Methods*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons; 2017. p.415-433.

Hoffman D.L. Inheritance and linkage relationships of morphological and isozyme loci in As-genome diploid oat (*Avena* spp.). *Journal of Heredity*. 1999;90(4):446-452. DOI: 10.1093/jhered/90.4.446

Houston K., McKim S.M., Comadran J., Bonar N., Druka I., Uzrek N. et al. Variation in the interaction between alleles of *HvAPETALA2* and *microRNA172* determines the density of grains on the barley inflorescence. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2013;110(41):16675-16680. DOI: 10.1073/pnas.1311681110

Ivanova Yu.S., Fomina M.N., Loskutov I.G. Biochemical indices of grain quality of the collection samples of naked oat under the conditions of Northern Forest-Steppe. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2018;32(6):38-41. [in Russian] (Иванова Ю.С., Фомина М.Н., Лоскутов И.Г. Биохимические показатели качества зерна у коллекционных образцов овса голозерного в условиях Северной Лесостепи. *Достижения науки и техники АПК*. 2018;32(6):38-41). DOI: 10.24411/0235-2451-2018-10609

Jensen J. Estimation of recombination parameters between a quantitative trait locus (QTL) and two marker gene loci. *Theoretical and Applied Genetics*. 1989;78(5):613-618. DOI: 10.1007/BF00262554

Kamal N., Tsardakas Renhuldt N., Bentzer J., Gundlach H., Haberer G., Juhász A. et al. The mosaic oat genome gives insights into a uniquely healthy cereal crop. *Nature*. 2022;606(7912):113-119. DOI: 10.1038/s41586-022-04732-y

Kang H.M., Sul J.H., Service S.K., Zaitlen N.A., Kong S.Y, Freimer N.B. et al. Variance component model to account for sample structure in genome-wide association studies. *Nature Genetics*. 2010;42(4):348-354. DOI: 10.1038/ng.548

Kapoor R., Singh T.P. Breeding oats for biotic and abiotic stresses. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2020;9(1):274-283. DOI: 10.20546/ijcmas.2020.901.032

Kianian S.F., Phillips R.L., Rines H.W., Fulcher R.G., Webster F.H., Stuthman D.D. Quantitative trait loci influencing β-glucan content in oat (*Avena sativa*, 2n=6x=42). *Theoretical and Applied Genetics*. 2000;101(7):1039-1048. DOI: 10.1007/s001220051578

Klos K.E., Huang Y.F., Bekele W.A., Obert D.E., Babiker E., Beattie A.D. et al. Population genomics related to adaptation in elite oat germplasm. *The Plant Genome*. 2016;9(2):0103. DOI: 10.3835/plantgenome2015.10.0103

Klos K.E., Yimer A.B., Babiker E.M., Beattie A.D., Bonman J.M., Carson M.L. et al. Genome-wide association mapping of crown rust resistance in oat elite germplasm. *The Plant Genome*. 2017;10(2):0107. DOI: 10.3835/plantgenome2016.10.0107

Korte A., Vilhjálmsson B.J., Segura V., Platt A., Long Q., Nordborg M. A mixed-model approach for genome-wide association studies of correlated traits in structured populations. *Nature Genetics*. 2012;44(9):1066-1071. DOI: 10.1038/ng.2376

Leggett J.M. Using and conserving *Avena* genetic resources. In: G.J. Scoles, B.G. Rossnagel (eds). *Proceedings of the 5th International Oat Conference and 7th International Barley Genetic Symposium*. Saskatoon: University of Saskatchewan; 1996. p.128-132.

Li Q., Fu C., Liang C., Ni X., Zhao X., Chen M. et al. Crop lodging and the roles of lignin, cellulose, and hemicellulose in lodging resistance. *Agronomy*. 2022;12(8):1795. DOI: 10.3390/agronomy12081795

Loskutov I.G. Oat (*Avena* L.). Distribution, systematics, evolution, and breeding value. St Petersburg: VIR; 2007. [in Russian] (Лоскутов И.Г. Овес (*Avena* L.). Распространение, систематика, эволюция и селекционная ценность. Санкт-Петербург: ВИР; 2007).

Loskutov I.G., Gnutikov A.A., Blinova E.V., Rodionov A.V. The origin and resource potential of wild and cultivated species of the genus of oats (*Avena* L.). *Russian Journal of Genetics*. 2021;57(6):642-661. DOI: 10.1134/S1022795421060065

Loskutov I.G., Polonskiy V.I. Content of β-glucans in oat grain as a perspective direction of breeding for health products and fodder (review). *Agricultural Biology*. 2017;52(4):646-657. DOI: 10.15389/agrobiology.2017.4.646eng

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

Loskutov I.G., Kovaleva O.N., Blinova E.V., Safonova I.V. Guidelines for the study and conservation of the global collection of barley, oats, and rye. St. Petersburg: VIR; 2024. [in Russian] (Лоскутов И.Г., Ковалева О.Н., Блинова Е.В., Сафонова И.В. Методические указания по изучению и сохранению мировой коллекции ячменя, овса и ржи. Санкт-Петербург: ВИР; 2024).

Lukina K.A., Shoeva O.Y., Kovaleva O.N., Loskutov I.G. Anthocyanin content in grains of barley and oat accessions from the VIR collection. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2021;4(3):5-14. [in Russian] (Лукина К.А., Шоева О.Ю., Ковалева О.Н., Лоскутов И.Г. Содержание антоцианов в образцах зерновок ячменя и овса из коллекции ВИР. *Биотехнология и селекция растений*. 2021;4(3):5-14). DOI: 10.30901/2658-6266-2021-3-o4

Makarova M.A., Karacheva G.S., Lomakina I.V., Semenova L.G. Findings of investigations on spring cereals genepool resistance to phytopathogenes in Priamurie. *Far East Agrarian Bulletin*. 2017;3(43):61-67. [in Russian] (Макарова М.А., Карачева Г.С., Ломакина И.В., Семенова Л.Г. Результаты изучения устойчивости генофонда яровых зерновых культур к фитопатогенам в Приамурье. *Дальневосточный аграрный вестник*. 2017;3(43):61-67).

Marshall H.G., Murphy C.F. Inheritance of dwarfness in three oat crosses and relationship of height to panicle and culm

length. *Crop Science*. 1981;21(2):335-338. DOI: 10.2135/cropsci1981.0011183X002100020033x

Milach S.C.K., Federizzi L.C. Dwarfing genes in plant improvement. *Advances in Agronomy*. 2001;73:35-66. DOI :10.1016/S0065-2113(01)73004-0

Milach S.C.K., Rines H.W., Phillips R.L. Molecular genetic mapping of dwarfing genes in oat. *Theoretical and Applied Genetics*. 1997;95(5):783-790. DOI: 10.1007/s001220050626

Milach S.C.K., Rines H.W., Phillips R.L., Stuthman D.D., Morikawa T. Inheritance of a new dwarfing gene in oat. *Crop Science*. 1998;38(2):356-360. DOI: 10.2135/cropsci1998.0011183X003800020013x

Miller S.S., Wood P.J., Pietrzak L.N., Fulcher R.G. Mixed linkage beta-glucan, protein content and kernel weigh in *Avena* species. *Cereal Chemistry*. 1993;70(2):231-233.

Mohammadi M., Xavier A., Beckett T., Beyer S., Chen L., Chikssa H. et al. Identification, deployment, and transferability of quantitative trait loci from genome-wide association studies in plants. *Current Plant Biology*. 2020;24:100145. DOI: 10.1016/j.cpb.2020.100145

Moiseeva M.N., Eremin D.I. The problem of lodging and productivity of oats at different levels of mineral nutrition in the forest-steppe of the Trans-Urals. *IZVESTIA Orenburg State Agrarian University*. 2022;4(96):46-50. [in Russian] (Моисеева М.Н., Ерёмин Д.И. Проблема полегания и урожайности овса при различном уровне минерального питания в лесостепи Зауралья. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2022;4(96):46-50).

Montilla-Bascón G., Rispail N., Sanchez-Martin J., Rubiales D., Mur L.A.J., Langdon T. et al. Genome-wide association study for crown rust (*Puccinia coronata* f. sp. *avenae*) and powdery mildew (*Blumeria graminis* f. sp. *avenae*) resistance in an oat (*Avena sativa*) collection of commercial varieties and landraces. *Frontiers in Plant Science*. 2015;6:103. DOI: 10.3389/fpls.2015.00103

Morikawa T. Genetic analysis on dwarfness of wild oats, *Avena fatua. The Japanese Journal of Genetics*. 1989;64(5):363-371. DOI: 10.1266/jjg.64.363

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

Newell M.A., Asoro F.G., Scott M.P., White P.J., Beavis W.D., Jannink J.L. Genome-wide association study for oat (*Avena sativa* L.) beta-glucan concentration using germplasm of worldwide origin. *Theoretical and Applied Genetics*. 2012;125(8):1687-1696. DOI: 10.1007/s00122-012-1945-0

Newell M.A., Cook D., Tinker N.A., Jannink J.L. Population structure and linkage disequilibrium in oat (*Avena sativa* L.): implications for genome-wide association studies. *Theoretical and Applied Genetics*. 2011;122(3):623-632. DOI: 10.1007/s00122-010-1474-7

Pauli D., Muehlbauer G.J., Smith K.P., Cooper B., Hole D., Obert D.E. et al. Association mapping of agronomic QTLs in U.S. spring barley breeding germplasm. *The Plant Genome*. 2014;7(3):0037. DOI: 10.3835/plantgenome2013.11.0037

Peng Y., Yan H., Guo L., Deng C., Wang Ch., Wang Y. et al. Reference genome assemblies reveal the origin and evolution of allohexaploid oat. *Nature Genetics*. 2022;54(8):1248-1258. DOI: 10.1038/s41588-022-01127-7

Polonskiy V.I., Surin N.A., Gerasimov S.A., Lipshin A.G., Sumina A.V., Zute S.A. Evaluation of barley genotypes for the content of *β*-glucans in grain and other valuable features in Eastern Siberia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021;182(1):48-58. [in Russian] (Полонский В.И., Сурин Н.А., Герасимов С.А., Липшин А.Г., Сумина А.В., Зюте С.А. Оценка образцов ячменя на содержание β-глюканов в зерне и другие ценные признаки в условиях Восточной Сибири. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2021;182(1):48-58). DOI: 10.30901/2227-8834-2021-1-48-58

Price A.L., Patterson N.J., Plenge R.M., Weinblatt M.E., Shadick N.A., Reich D. Principal components analysis corrects for stratification in genome-wide association studies. *Nature Genetics*. 2006;38(8):904-909. DOI: 10.1038/ng1847

Pritchard J.K., Stephens M., Donnelly P. Inference of population structure using multilocus genotype data. *Genetics*. 2000;155(2):945-959. DOI: 10.1093/genetics/155.2.945

Purcell S., Neale B., Todd-Brown K., Thomas L., Ferreira M.A.R., Bender D. et al. PLINK: a tool set for whole-genome association and population-based linkage analyses. *American Journal of Human Genetics*. 2007;81(3):559-575. DOI: 10.1086/519795

Rasheed A., Hao Y., Xia X., Khan A., Xu Y., Varshney R.K. et al. Crop breeding chips and genotyping platforms: progress, challenges, and perspectives. *Molecular Plant*. 2017;10(8):1047-1064. DOI: 10.1016/j.molp.2017.06.008

Redaelli R., Del Frate V., Bellato S., Terracciano G., Ciccoritti R., Germeier C.U. et al. Genetic and environmental variability in total and soluble *β*-glucan in European oat genotypes. *Journal of Cereal Science*. 2013;57(2):193-199. DOI: 10.1016/j.jcs.2012.09.003

Rispail N., Montilla-Bascón G., Sanchez-Martín J., Flores F., Howarth C., Langdon T. et al. Multi-environmental trials reveal genetic plasticity of oat agronomic traits associated with climate variable changes. *Frontiers in Plant Science*. 2018;9:1358. DOI: 10.3389/fpls.2018.01358

Rodionov A.V., Machs E.M., Mikhailova Yu.V., Loskutov I.G., Amosova A.V., Krainova L.M. et al. Phenomenon of multiple mutations in the 35S rRNA genes of the C subgenome of polyploid *Avena* L. *Russian Journal of Genetics*. 2020;56(6):674-683. DOI: 10.31857/S0016675820060090

Rozanova I.V., Khlestkina E.K. NGS sequencing in barley breeding and genetic studies. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2020;24(4):348-355. [in Russian] (Розанова И.В., Хлесткина Е.К. NGS-секвенирование в селекционно-генетических исследованиях ячменя. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2020;24(4):348-355). DOI: 10.18699/VJ20.627

Shvachko N., Solovyeva M., Rozanova I., Kibkalo I., Kolesova M., Brykova A. et al. Mining of QTLs for spring bread wheat spike productivity by comparing spring wheat cultivars released in different decades of the last century. *Plants*. 2024;13(8):1081. DOI: 10.3390/plants13081081

Shvachko N.A., Loskutov I.G., Semilet T.V., Popov V.S., Kovaleva O.N., Konarev A.V. Bioactive components in oat and barley grain as a promising breeding trend for functional food production. *Molecules*. 2021;26(8):2260. DOI: 10.3390/molecules26082260

Shvachko N.A., Semilet T.V., Popov V.S., Blinova E.V., Loskutov I.G. Studying polymorphism of the gene *CslF6* associated with *β*-D-glucan biosynthesis in diploid oat accessions of *Avena strigosa* Schreb. from the VIR collection. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(1):191-201. [in Russian] (Швачко Н.А., Семилет Т.В., Попов В.С., Блинова Е.В., Лоскутов И.Г. Изучение полиморфизма гена *CslF6*, ассоциированного с биосинтезом β-D-глюкана, у диплоидных образ-

цов овса *Avena strigosa* Schreb. из коллекции ВИР. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(1):191-201). DOI: 10.30901/2227-8834-2025-1-191-201

Sikora P., Tosh S.M., Brummer Y., Olsson O. Identification of high *β*-glucan oat lines and localization and chemical characterization of their seed kernel *β*-glucans. *Food Chemistry*. 2013;137(1-4):83-91. DOI: 10.1016/j.foodchem.2012.10.007

Single R.M., Thomson G. Linkage disequilibrium: population genetics of multiple loci. In: R.M. Kliman (ed.). *Encyclopedia of Evolutionary Biology*. Cambridge, MA: Academic Press; 2016. p.400-404. DOI: 10.1016/B978-0-12-800049-6.00030-5

Smuldersa M.J.M., van de Wiela C.C.M., van den Broecka H.C., van der Meera I.M., Israel-Hoevelakena T.P.M., Timmera R.D. et al. Oats in healthy gluten-free and regular diets: A perspective. *Food Research International*. 2018;110:3-10. DOI: 10.1016/j.foodres.2017.11.03

Song G., Huo P., Wu B., Zhang Z. A genetic linkage map of hexaploid naked oat constructed with SSR markers. *The Crop Journal*. 2015;3(4):353-357. DOI: 10.1016/j.cj.2015.01.005

Tinker N.A., Chao S., Lazo G.R., Oliver R.E., Huang Y.F., Poland J.A. et al. A SNP genotyping array for hexaploid oat. *The Plant Genome*. 2014;7(3):0010. DOI: 10.3835/plantgenome2014.03.0010

Tinker N.A., Wight C.P., Bekele W.A., Yan W., Jellen E.N., Renhuldt N.T. et al. Genome analysis in *Avena sativa* reveals hidden breeding barriers and opportunities for oat improvement. *Communications Biology*. 2022;5(1):474. DOI: 10.1038/s42003-022-03256-5

Toole G.A., Le Gall G., Colquhoun I.J., Drea S., Opanowicz M., Bedö Z. et al. Spectroscopic analysis of diversity in the spatial distribution of arabinoxylan structures in endosperm cell walls of cereal species in the HEALTHGRAIN diversity collection. *Journal of Cereal Science*. 2012;56(2):134-141. DOI: 10.1016/j.jcs.2012.02.016

Tumino G., Voorrips R.E., Morcia C., Ghizzoni R., Germeier C.U., Paulo M.J. et al. Genome-wide association analysis for lodging tolerance and plant height in a diverse European hexaploid oat collection. *Euphytica*. 2017;213(8):163. DOI: 10.1007/s10681-017-1939-8

Tumino G., Voorrips R.E., Rizza F., Badeck F.W., Morcia C., Ghizzoni R. et al. Population structure and genome-wide association analysis for frost tolerance in oat using continuous SNP array signal intensity ratios. *Theoretical and Applied Genetics*. 2016;129(9):1711-1724. DOI: 10.1007/s00122-016-2734-y

Valevskaya L., Dzyuba N., Bunyak E., Evdokimova G. The meaning of grain cultures in healthy food. *Sciences of Europe*. 2017;18(18):71-73.

Wang L., Xu J., Wang H., Chen T., You E., Bian H. et al. Population structure analysis and genome-wide association study of a hexaploid oat landrace and cultivar collection. *Frontiers in Plant Science*. 2023;14:1131751. DOI: 10.3389/fpls.2023.1131751

Weller J.I. Genomic selection of animals. St. Petersburg: Prospekt Nauki; 2018. [in Russian] (Веллер Дж.И. Геномная селекция животных. Санкт-Петербург: Проспект Науки; 2018).

Winkler L.R., Bonman J.M., Chao S., Yimer B.A., Bockelman H., Klos K.E. Population structure and genotype–phenotype associations in a collection of oat landraces and historic cultivars. *Frontiers in Plant Science*. 2016;7:1077. DOI: 10.3389/fpls.2016.01077

Yan H., Yu K., Xu Y., Zhou P., Zhao J., Li Y. et al. Position validation of the dwarfing gene *Dw6* in oat (*Avena sativa* L.) and its correlated effects on agronomic traits. *Frontiers in Plant Science*. 2021;12:668847. DOI: 10.3389/fpls.2021.668847

Yan H., Zhang H., Zhou P., Ren C., Peng Y. Genome-wide association mapping of QTL underlying groat protein content of a diverse panel of oat accessions. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023;24(6):5581. DOI: 10.3390/ijms24065581

Yan H., Zhou P., Peng Y., Bekele W.A., Ren C., Tinker N.A. et al. Genetic diversity and genome-wide association analysis in Chinese hulless oat germplasm. *Theoretical and Applied Genetics*. 2020;133(7):3365-3380. DOI: 10.1007/s00122-020-03674-1

Yang J., Lee S.H., Goddard M.E., Visscher P.M. GCTA: a tool for genome-wide complex trait analysis. *American Journal of Human Genetics*. 2011;88(1):76-82. DOI: 10.1016/j.ajhg.2010.11.011

Zhu C., Gore M., Buckler E.S., Yu J. Status and prospects of association mapping in plants. *The Plant Genome*. 2008;1(1):0089. DOI: 10.3835/plantgenome2008.02.0089

Zimmer C.M., McNish I.G., Klos K.E., Eickholt D.P., Arruda K.M.A., Pacheco M.T. et al. Genome-wide association mapping for kernel shape and its association with *β*-glucan content in oats. *Crop Science*. 2021;61(6):3986-3999. DOI: 10.1002/csc2.20605

Zimmer C.M., McNish I.G., Klos K.E., Oro T., Arruda K.M.A., Gutkoski L.C. et al. Genome-wide association for *β*-glucan content, population structure, and linkage disequilibrium in elite oat germplasm adapted to subtropical environments. *Molecular Breeding*. 2020;40(11):103. DOI: 10.1007/s11032-020-01182-0

Zimmer C.M., Ubert I.P., Pacheco M.T., Federizzi L.C. Molecular and comparative mapping for heading date and plant height in oat. *Euphytica*. 2018;214(6):101. DOI: 10.1007/s10681-018-2182-7

Информация об авторах

Наталия Альбертовна Швачко, 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, n.shvachko@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-1958-5008

Татьяна Вячеславовна Семилет, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, t.semilet@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0001-7275-3878

Ольга Николаевна Ковалева, 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, o.kovaleva@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-3990-6526

Ксения Андреевна Лукина, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, k.lukina@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0001-5477-8684

Игорь Градиславович Лоскутов, доктор биологических наук, доцент, главный 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, i.loskutov@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-9250-7225

Information about the authors

Nataliya A. Shvachko, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, n.shvachko@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-1958-5008

Tatyana V. Semilet, Associate Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, t.semilet@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0001-7275-3878

Olga N. Kovaleva, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, o.kovaleva@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-3990-6526

Kseniia A. Lukina, Associate Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, k.lukina@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0001-5477-8684

Igor G. Loskutov, Dr. Sci. (Biology), Associate Professor, Chief Researcher, Head of a Department, 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.org/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 17.04.2025; одобрена после рецензирования 05.09.2025; принята к публикации 22.10.2025.
The article was submitted on 17.04.2025; approved after reviewing on 05.09.2025; accepted for publication on 22.10.2025.

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

Научная статья
УДК 633.16:631.524
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o16

CC BY

Скороспелость и фотопериодическая чувствительность образцов ячменя из стран Восточной Азии

Р. А. Абдуллаев[1], Б. А. Баташева[2], О. Н. Ковалева[1], З. А. Щедрина[1], Е. Е. Радченко[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, Дагестанская опытная станция – филиал ВИР, Дербентский район, Россия,

Автор, ответственный за переписку: Ренат Абдуллаевич Абдуллаев, abdullaev.1988@list.ru

Актуальность. Ячмень (*Hordeum vulgare* L.) относится к широко распространенным, издревле возделываемым культурам. В настоящее время ячмень занимает ведущие позиции по посевным площадям среди зерновых. В связи с растущей проблемой изменения климата все более популярным становится перемещение сельского хозяйства в северные регионы. Важными признаками, определяющими адаптивность ячменя и широту географического продвижения, являются скорость развития и нечувствительность к различным условиям произрастания.
Материал и методы. Исследовали продолжительность межфазного периода «всходы – колошение» 660 образцов ячменя из стран Восточной Азии. При помощи ДНК-маркеров изучили аллельное состояние генов *Ppd* и *VRN* у 51 скороспелого в условиях северо-запада России образца. Оценили чувствительность к фотопериоду 44 скороспелых в полевых условиях генотипов. В качестве контроля использовали образцы, характеризующиеся скороспелостью в различных почвенно-климатических условиях: 'Bankuti Korai', 'Kinai 5', 'Mona', к-15013. При изучении материала руководствовались общепринятыми методическими указаниями ВИР.
Результаты и выводы. В условиях длинного дня выделено 19 образцов с очень высокой скоростью развития. Идентифицировали 11 групп с различными аллельными комбинациями генов *Ppd* и *VRN*. Наиболее распространенной среди скороспелых образцов ячменя оказалась комбинация аллелей *Ppd-H1Ppd-H2vrn-H1vrn-H2vrn-H3*, то есть 2 доминантных и 3 рецессивных – «DD-RRR», представленная 17 генотипами. Среди поздних и озимых образцов ячменя отсутствуют наиболее распространенные у скороспелых форм сочетания «DD-RRR», «DR-DRD», «DD-DDR» и «DR-RRR», что может свидетельствовать об их диагностической ценности. Выделили 15 источников слабой фотопериодической чувствительности. Образец к-12223 из Китая отличается скороспелостью и отсутствием реакции на продолжительность дня.

Ключевые слова: *Hordeum vulgare*, Восточная Азия, аллель, фотопериод, чувствительность, всходы, колошение

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ 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».

***Для цитирования*:** Абдуллаев Р.А., Баташева Б.А., Ковалева О.Н., Щедрина З.А., Радченко Е.Е. Скороспелость и фотопериодическая чувствительность образцов ячменя из стран Восточной Азии. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(1):204-216. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o16

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

© Абдуллаев Р.А., Баташева Б.А., Ковалева О.Н., Щедрина З.А., Радченко Е.Е., 2026

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

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o16

Earliness and photoperiod sensitivity of barley accessions from East Asian countries

Renat A. Abdullaev[1], Belahan A. Batasheva[2], Olga N. Kovaleva[1], Zoya A. Shchedrina[1], Evgeny E. Radchenko[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, Dagestan Experiment Station – branch of VIR, Derbentsky District, Russia*

Corresponding author: Renat A. Abdullaev, abdullaev.1988@list.ru

Background. Barley (*Hordeum vulgare* L.) is a staple crop cultivated since ancient times. Currently, barley is the leader among cereals in acreage. Due to the growing concern about climate change, the relocation of agriculture to northern regions becomes increasingly popular. Important traits that determine plant adaptability and the range of its geographic expansion include its rate of development and tolerance to various growing conditions.
Materials and methods. The duration of the germination-to-heading period was studied in 660 barley accessions from East Asian countries. DNA-markers were used to analyze the allelic state of the *Ppd* and *VRN* genes in 51 accessions that matured early in Northwest Russia. The photoperiod sensitivity was assessed for 44 genotypes maturing early in the field. The accessions that demonstrated earliness under various soil and climatic conditions, including 'Bankuti Korai', 'Kinai 5', 'Mona', and k-15013, served as controls. The tested material was analyzed in accordance with conventional guidelines adopted at VIR.
Results and conclusions. Nineteen accessions with very high development rates were selected under long-day conditions in Northwest Russia. Eleven groups with different allelic combinations of the *Ppd* and *VRN* genes were identified. The most frequent allele combination among early-maturing barley accessions was *Ppd-H1Ppd-H2vrn-H1vrn-H2vrn-H3*, i.e., two dominant and three recessive alleles (DD-RRR), represented by 17 genotypes. The most common combinations among early barleys: DD-RRR, DR-DRD, DD-DDR, and DR-RRR, were absent in late-maturing and winter barley accessions, which may attest to their diagnostic value. Fifteen sources of weak photoperiod sensitivity were selected. Accession k-12223 from China was identified for its earliness and lack of response to day length.

Keywords: *Hordeum vulgare*, East Asia, allele, photoperiod, sensitivity, germination, heading

Acknowledgments: the study was conducted within the framework of the state task assigned by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, 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".

For citation: Abdullaev R.A., Batasheva B.A., Kovaleva O.N., Shchedrina Z.A., Radchenko E.E. Earliness and photoperiod sensitivity of barley accessions from East Asian countries. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(1):204-216. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o16

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Ячмень (*Hordeum vulgare* L.) относится к числу древнейших возделываемых культур (Pourkheirandish et al., 2015). В настоящее время вид имеет очень широкий ареал и занимает ведущие позиции по посевным площадям среди зерновых. В основных областях выращивания *H. vulgare* довольно часто отмечается неблагоприятное сочетание климатических и почвенных условий. Ячмень более приспособлен к сезонным колебаниям в сравнении с большинством других зерновых культур, тем не менее значительная часть урожая растений может теряться в результате пагубного влияния природных явлений, ухудшения почвенного плодородия, распространения на посевах вредителей и болезней.

Успехи современной селекции сельскохозяйственных культур определяются многими факторами, среди которых важная роль принадлежит экологической пластичности растений и высокой адаптивности к условиям выращивания. Н. И. Вавилов (Vavilov, 1957) указывал, что продолжительность периода вегетации – важнейшее экологическое свойство сортов – во многом зависит от влияния на растения погодных условий. Синхронизация цикла развития растений с условиями окружающей среды предоставила возможность расширения возделывания многих сельскохозяйственных культур в регионах, далеких от их центров происхождения (Knüpffer et al., 2003; Cockram et al., 2007; Zohary et al., 2012). Высокая скорость развития ячменя позволяет выращивать его при неблагоприятных для многих других сельскохозяйственных растений условиях среды, что важно для России с ее весьма разнообразными эколого-географическими регионами. В условиях меняющегося климата поиск и внедрение в производство новых источников хозяйственно ценных признаков ячменя имеет большое значение для адаптации культуры к новым условиям выращивания (Verstegen et al., 2014).

К настоящему времени известно множество работ, посвященных изучению скорости развития ячменя, в результате которых выявлены образцы, характеризующиеся разной скоростью развития (Abdullaev, 2015; Schreiber et al., 2024; Benlioglu et al., 2025). Продемонстрировано существенное различие образцов ячменя по скорости развития среди экологических групп, что обусловлено разной адаптацией к природно-климатическим факторам (Lukyanova, 1958; Abdullaev, 2015). Кроме того, выделены образцы, не реагирующие на условия внешней среды, которые также могут быть ценным исходным материалом для селекции (Abdullaev, 2015; Zveinek et al., 2021; Benlioglu et al., 2025). Исследование образцов ячменя из различных эколого-географических областей продемонстрировало, что скороспелые и ультраскороспелые генотипы сосредоточены в основном в Северо-Западном и Центральном регионах России, в Сибири, странах Балтии, Скандинавии, Эфиопии, Турции и Индии (Zaushintsena, 2009; Batakova, 2009). Довольно низка вероятность встречаемости ранних форм ячменя в Среднеазиатском и Новосветском центрах разнообразия культуры (Batasheva, 2012).

Ячмень является растением длинного светового дня (длиннодневным): чем продолжительнее освещение, тем меньше задержка колошения (Laurie et al., 1995). Сроки колошения ячменя могут определяться множеством факторов, среди которых ключевыми являются гены, контролирующие нечувствительность к фотопериоду (*Ppd*), озимый либо яровой тип развития (*VRN*) и собственно скороспелость (*eps*). Наиболее изученными генетическими системами, обуславливающими разнообразие по времени цветения ячменя, являются аллели генов *Ppd-H1* (*HvPRR37*), *Ppd-H2* (*HvFT3*), *VRN-H1* (*HvBM5A*), *VRN-H2* (*HvZCCTa-c*), *VRN-H3* (*HvFT1*) и гены *eps*, например *eam8* (ea_k) (Takahashi, Yasuda, 1971; Laurie et al., 1995; Yan et al., 2006; Zakhrabekova et al., 2012; Fernández-Calleja et al., 2021).

Гены *Ppd-H1* и *Ppd-H2* (photoperiod response) локализованы в хромосомах 2H и 1H. Доминантный аллель *Ppd-H1* контролирует быструю реакцию растений на удлинение фотопериода и раннее выколашивание ячменя при длинном дне. Задержку колошения при продолжительном дне обусловливает рецессивный аллель *ppd-H1*. Доминантный аллель *Ppd-H2* на коротком дне ускоряет начало колошения, в рецессивном состоянии – задерживает (Laurie et al., 1995; Casao et al., 2011; Fernández-Calleja et al., 2021). Гены *VRN* (*VERNALIZATION*): *VRN-H1* (хромосома 4H), *VRN-H2* (5H) и *VRN-H3* (1H) детерминируют необходимость растений в яровизации и участвуют в регуляции развития ячменя для перехода к колошению (Yan et al., 2006; Fernández-Calleja et al., 2021). Согласно принятой в настоящее время модели, яровизация индуцирует экспрессию *VRN-H1*, который подавляет ген *VRN-H2*. Потеря активности *VRN-H2* обусловливает экспрессию гена *VRN-H3*, который в свою очередь участвует в регуляции транскриптов *VRN-H1*, необходимых для инициации цветения (Distelfeld et al., 2009).

Большим разнообразием по адаптивно важным признакам характеризуются образцы *H. vulgare* из генетических центров происхождения и доместикации. Ранее нами была изучена изменчивость фрагмента коллекции ячменей из Восточноазиатского генцентра по устойчивости к вредным организмам (Radchenko et al., 2022; Abdullaev et al., 2023) и слабой чувствительности к фотопериоду, обусловленной геном *eam8* (Zveinek et al., 2022).

Цель настоящей работы – исследовать разнообразие *H. vulgare* из стран Восточной Азии по скороспелости и фотопериодической чувствительности, контролируемых генами *Ppd* и *VRN.*

Материал и методы

Исследовали продолжительность межфазного периода «всходы – колошение» 660 образцов ячменя из Восточноазиатского центра разнообразия (240 образцов из Китая, 239 из Японии, 169 из Монголии и 12 из Непала). Сроки колошения опытных образцов учитывали на экспериментальном поле научно-производственной базы (НПБ) «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» (Санкт-Петербург, Пушкин). Условия проведения опытов в течение двух лет изучения (2021–2022) сильно различались, причем погодные условия в 2021 г. отличались от среднемноголетних данных наиболее существенно. Так, в мае выпало 139,0 мм осадков, что почти в три раза превысило многолетние данные. Начиная с третьей декады июля до конца августа (период созревания ячменя) выпало 183,8 мм, что также значительно превысило норму. Напротив, в период с 29 мая до 20 июля (53 дня, период «кущение – колошение» ячменя) выпало всего лишь 23,6 мм осадков, а температура воздуха в этот период практически ежедневно превышала норму. Июнь 2021 г. стал самым жарким за всю историю метеонаблюдений, пять дней подряд с 19 по 23 июня было установлено пять суточных рекордов температуры (табл. 1). Погодные

Таблица 1. Погодные условия (Санкт-Петербург, Пушкин; 2021–2022 гг.)*
Table 1. Weather conditions (Pushkin, St. Petersburg; 2021–2022)

Годы изучения	Параметры	Метеорологические условия			
		Май	Июнь	Июль	Август
2021	Температура, °C	12,1	21,4	23,1	16,9
	Сумма осадков, мм	139,0	22,0	50,0	135
2022	Температура, °C	10,0	17,6	19,9	20,6
	Сумма осадков, мм	26,0	47,0	84,0	113,0
Средние многолетние	**Температура, °C**	**11,5**	**16,1**	**19,1**	**17,4**
	Сумма осадков, мм	**47,0**	**69,0**	**76,0**	**87,0**

Примечание: * – справочно-информационный портал «Погода и климат» (https://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=26063)
Note: * – the weather and climate reference and information portal (https://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=26063)

условия в 2022 г. отличались от среднемноголетних данных незначительно.

Изучаемый материал высевали на делянках площадью 1 кв. м, междурядья – 15 см. Условия проведения исследований характеризуются отсутствием яровизации (яровой посев) и продолжительным световым днем. В качестве контроля использовали образцы, характеризующиеся скороспелостью в различных почвенно-климатических условиях: 'Bankuti Korai', 'Kinai 5', 'Mona', к-15013 (Abdullaev et al., 2017) и допущенный к выращиванию на северо-западе России сорт 'Белогорский'. При изучении материала руководствовались методическими указаниями по изучению мировой коллекции ячменя, овса и ржи, разработанными в ВИР (Loskutov et al., 2012, 2024), а также «Международного классификатора СЭВ рода *Hordeum* L. (подрод *Hordeum*)» (Lekeš et al., 1983). Всходы растений отмечали датой, когда на поверхности почвы появлялись развернутые листья более 75% растений на делянке. Колошение фиксировали при появлении наполовину колоса из влагалища последнего листа. Колошение отмечали при выколашивании 75% растений (Loskutov et al., 2012). Для корректного сопоставления скорости развития изучаемого материала в разные по климатическим условиям годы и сроки посева рассчитывали коэффициент «превышение периода "всходы – колошение" образца над минимальным значением этого признака по выборке» (ППВК), то есть из показателя скорости развития данного образца до колошения вычитали минимальное по всем изученным образцам (Zveinek et al., 2021).

Исследовали аллельное состояние генов *PpD* и *VRN* у 51 скороспелого среди изученной выборки в условиях северо-запада России образца ячменя. Для сравнительной характеристики аллельных комбинаций генов, контролирующих нечувствительность к фотопериоду и тип развития, были изучены по десять наиболее позднеспелых и озимых генотипов. ДНК выделяли индивидуально из семидневных проростков (2 растения каждого образца) по методике Д. Б. Дорохова и Э. Клоке (Dorokhov, Klocke, 1997) с некоторыми модификациями (Anisimova et al., 2018). Амплификацию генетического материала проводили в реакционной смеси объемом 15–25 мкл, которая содержала геномную ДНК (50–100 нг), 1х-реакционный буфер без $MgCl_2$, 2–3 mM хлористого магния, по 0,25 мМ dNTP's, 250 nM каждого олигонуклеотида, 1 единицу Taq-полимеразы («Диалат»). ПЦР выполняли на амплификаторе MiniAmp Plus (Thermo FS, США). Список использовавшихся в работе праймеров представлен в таблице 2.

Продукты амплификации разделяли с помощью электрофореза в 2-процентном агарозном геле при напряжении 5 V/см в 1xTBE-буфере. Гель после окрашивания бромистым этидием визуализировали в свете ультрафиолета. Для оценки размера ДНК-фрагментов применяли маркер FastRuler™ SM1113. Для идентификации аллелей генов *Ppd-H1* и *Vrn-H3* проводили рестрикцию продуктов амплификации с помощью рестриктаз MspI и Ksp22I соответственно. Реакционную смесь помещали в термостат при 37°C в течение 16 ч. ДНК-фрагменты разделяли в 3-процентном агарозном геле.

В 2022–2023 гг. на фотопериодической площадке НПБ «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» оценили чувствительность к фотопериоду скороспелых в условиях поля 44 образцов ячменя. Растения выращивали в 8-литровых сосудах с почвой (10 растений на сосуд) в условиях естественного длинного (17–19 ч) и короткого (12 ч) фотопериода. Колошение каждого растения отмечали при выходе половины колоса главного стебля из влагалища. Фотопериодическую чувствительность (ФПЧ) определяли по величине задержки колошения при коротком дне (КД) по сравнению с длинным днем (ДД) ($T_2 - T_1$), а также с помощью коэффициента ФПЧ ($К_{фпч}$), который высчитывали по формуле $К_{фпч} = T_2/T_1$, где T_1 и T_2 – период «всходы – колошение» (дней) у растений, выращенных в условиях длинного естественного и короткого 12-часового дня соответственно (Koshkin, 2012). Образцы, отстающие в развитии на КД в сравнении с ДД в пределах 1–8 дней и имеющие $К_{фпч}$ от 0,8 до 1,2, относили к группе слабочувствительных к фотопериоду. В качестве контроля использовали сорта 'Mari' (индуцированный мутант, гомозиготный по *eam8*), 'Kinai 5' (несет естественную мутацию, гомозиготный по *eam8.k*) и чувствительный к фотопериоду сорт ярового ячменя 'Белогорский' (*Eam8)*.

Результаты и обсуждение

Скороспелость

Период «всходы – колошение» многих образцов выборки ячменя в 2021 г. отличался от наблюдавшегося в 2022 г. и составил 27–78 дней, в среднем – 40,4 (табл. 3). В 2022 г. размах варьирования признака составлял 31–57

Таблица 2. **Последовательности использовавшихся праймеров**
Table 2. **Sequences of the primers used in the study**

Праймер	Последовательности нуклеотидов (5' → 3')	Аллель	Литературный источник
Jones5-F Jones5-R	GATGGATTCAAAGGCAAGGA CGTTAGAGCCCTGCTTCATC	*Ppd-H1/ppd-H1*	Jones et al., 2008
HvFT3-F HvFT3-R	GTCCTCCTCCAGTATATGTC CTACTCCCCTTGAGAACTTTC	*Ppd-H2*	Kikuchi et al., 2009
HvFT3-F4 HvFT3-R1	GGATGGATCGGATTATTATTGTATG CTGCACATTATTTGTGATGCAA	*ppd-H2*	
HvBM5A-intronI-F1 HvBM5A-TE-R1	GTTCTCCACCGAGTCATGG AGAGATGGAGGCATGGAGCA	*Vrn-H1*	Cockram et al., 2009
HvBM5A-exon2-F1 HvBM5A-exon2-R1	TCCCAAGAAAACTTGAACAACACCAG ATTAGGTTACATCATTCGACCA	*Vrn-H1/vrn-H1*	
HvBM5A-intronI-F3b HvBM5A-intronI-R3b	CTTGCATGTGTTGTCGGTCT GCTGGGACAAGACTCTACGG	*vrn-H1*	
HvZCCT.06F HvZCCT.07R	CCTAGTTAAAACATATATCCATAGAGC GATCGTTGCGTTGCTAATAGTG	*Vrn-H2*	Karsai et al., 2005
HvFT1-R HvFT1-F	ACGTACGTCCCTTTTCGATG CGCTAGGACTTGGAGCATCT	*Vrn-H3/ vrn-H3*	Kikuchi et al., 2009

Таблица 3. **Продолжительность межфазного периода «всходы – колошение» образцов ячменя из стран Восточной Азии** (Санкт-Петербург, Пушкин; 2021–2022 гг.)
Table 3. **Duration of the germination-to-heading period in barley accessions from East Asian countries** (Pushkin, St. Petersburg; 2021–2022)

Год изучения	Изучено образцов	Распределение образцов по продолжительности периода «всходы – колошение», шт.							
		25–30	31–35	36–40	41–45	46–50	51–55	56–60	> 60
2021	660	4	50	288	287	11	4	4	12
2022	608	0	24	200	236	111	34	3	0

(среднее 42,1) дней. Широкий размах варьирования и позднее колошение некоторых образцов в 2021 г., скорее всего, объясняется их чувствительностью к относительно высокой (21,4°C и 23,1°C) среднемесячной температуре (отклонение от нормы +5,3°C и +4,0°C соответственно) в июне и июле, а также низким количеством выпавших осадков в периоды выхода в трубку и колошения ячменей (см. табл. 1).

В условиях продолжительного светового дня ячмени из стран Восточной Азии характеризуются большим количеством скороспелых форм. Высокую скорость развития (ППВК – 0–5 дней) в течение двух лет наблюдали у 24 образцов (табл. 4). Наиболее скороспелыми (27–35 дней) оказались 19 генотипов (см. табл. 4). Большинство изученных форм показали себя среднеспелыми. Гетерогенностью по скорости развития в условиях северо-запада РФ характеризовались 99 образцов ячменя, у многих из них наблюдался полиморфизм по типу развития, причем проявилось это лишь в 2022 г. Превышение периода «всходы – колошение» для контролей составляло 5 дней у очень скороспелого образца местного ячменя из Дагестана к-15013 и 8, 9, 10 дней – у сортов 'Mona', 'Kinai 5' и 'Bankuti Korai' соответственно (см. табл. 4).

Интересным результатом исследования оказалось обнаружение среди ячменей из стран Восточной Азии большого количества образцов, не реагирующих или реагирующих слабо по скорости развития на сильно различающиеся погодные условия. Выявлено 57 генотипов, период «всходы – колошение» которых не менялся в контрастные по погодным условиям 2021 и 2022 г. Задержка колошения 294 образцов составляла 1–3 дня.

Аллельное разнообразие участвующих в контроле продолжительности межфазного периода «всходы – колошение» генов Ppd и VRN

Среди наиболее скороспелых генотипов аллель *Ppd-H1* имеет подавляющее большинство: 46 форм из 51 проанализированной (табл. 5). Три изученных генотипа (к-3513, к-6992, к-12291) имеют аллель *ppd-H1*, который обусловливает ранее колошение в условиях короткого дня. Образцы к-7061 и к-3952 оказались гетерогенными (не представлены в табл. 5), два изученных растения каждого образца отличались друг от друга и имели рецессивный и доминантный аллели (*ppd-H1* и *Ppd-H1*). Ячмени из стран Восточной Азии характеризуются большим количеством для изученной выборки образцов (90,2%), несущих доминантный аллель *Ppd-H1*. В наших

Таблица 4. Наиболее скороспелые образцы ячменя из стран Восточной Азии
(Санкт-Петербург, Пушкин; 2021–2022 гг.)

Table 4. The earliest among the studied barley accessions from East Asian countries
(Pushkin, St. Petersburg; 2021–2022)

№ по каталогу ВИР	Образец	Разновидность	Происхождение	Продолжительность периода «всходы – колошение», сут. (ППВК)		
				2021	2022	среднее
12223	'Ychang'	*nutans*	Китай	37 (10)	32 (1)	34,5 (5,5)
12246	Местный	*pallidum*	Китай	31 (4)	33 (2)	32,0 (3,0)
12272	'Shantung'	*coeleste*	Китай	31 (4)	34 (3)	32,5 (3,5)
12287	Местный	*pallidum*	Китай	29 (2)	34 (3)	31,5(2,5)
15582	Местный	*coeleste*	Китай	31 (4)	35 (4)	33,0(4,0)
15894	Местный	*pallidum*	Китай	32 (5)	37 (6)	34,5 (5,5)
18439	Местный	*himalayense*	Китай	31 (4)	35 (4)	33,0(4,0)
18440	Местный	*trifurcatum, kobdicum, coeleste*	Китай	31 (4)	34 (3)	32,5 (3,5)
18442	Местный	*coeleste, himalayense*	Китай	31 (4)	35 (4)	33,0 (4,0)
18451	Местный	*violaceum, coeleste, himalayense, subnudipiramidatum*	Китай	29 (2)	33 (2)	31,0 (2,0)
19000	'Ла-са-пай-цин-кэ'	*coeleste*	Китай	31 (4)	35 (4)	33,0 (4,0)
19001	'Ласа-джи-цин-кэ'	*coeleste*	Китай	32 (5)	36 (5)	34,0 (5,0)
19494	'Mie'	*subparallelum*	Япония	32 (5)	33 (2)	32,5 (3,5)
19522	'Fukumugi'	*parallelum*	Япония	33 (6)	36 (5)	34,5 (5,5)
20247	'Aizu N4'	*parallelum*	Япония	28 (1)	33 (2)	30,5(1,5)
21706	Местный	*coeleste, himalayense, pallidum*	Монголия	27 (0)	34 (3)	30,5 (1,5)
22093	'Baitori'	*parallelum*	Япония	32 (5)	35 (4)	33,5 (4,5)
22440	'KOS'	*erectum*	Япония	34 (7)	34 (3)	34,0 (5,0)
25586	'Suwon 29'	*pyramidatum*	Япония	31 (4)	35 (4)	33,0 (4,0)
25592	'Aizu'	*parallelum, intermedium*	Япония	32 (5)	34 (3)	33,0 (4,0)
25604	'Hoho'	*pallidum*	Япония	31 (4)	34 (3)	32,5 (3,5)
27525	'Hayachine Mugi'	*parallelum*	Япония	33 (6)	33 (2)	33,0 (4,0)
30259	'Misato Golden'	*erectum*	Япония	32 (5)	37 (6)	34,5 (5,5)
30849	C 226 ZDM 1422	*pallidum*	Китай	32 (5)	31 (0)	31,5 (2,5)
'Bankuti Korai' **(контроль)**				38(11)	40 (9)	39 (10)
'Kinai 5' **(контроль)**				36 (9)	40 (9)	38 (9)
'Mona' **(контроль)**				36 (9)	38 (7)	37 (8)
к-15013 **(контроль)**				32 (5)	36 (5)	34 (5)
'Белогорский' **(допущенный к выращиванию сорт)**				40 (13)	42 (9)	41 (11)
Среднее значение для всех изученных образцов				**40,4 (13,4)**	**42,5 (11,4)**	**41,45 (12,4)**

Таблица 5. **Комбинации аллелей генов *Ppd-H1*, *Ppd-H2*, *VRN-H1*, *VRN-H2* и *VRN-H3* у образцов ячменя из стран Восточной Азии**

Table 5. **Combinations of alleles for the *Ppd-H1*, *Ppd-H2*, *VRN-H1*, *VRN-H2* and *VRN-H3* genes in barley accessions from East Asian countries**

Аллельное состояние генов *Ppd* и *VRN*					Количество образцов	Продолжительность периода «всходы – колошение», среднее, сут. (ППВК)
Ppd-H1	*Ppd-H2*	*VRN-H1*	*VRN-H2*	*VRN-H3*		
Скороспелые образцы						
D	D	D	D	R	5	36,0 (7,0)
D	D	D	R	R	2	36,25 (7,25)
D	D	R	D	R	3	33,83 (4,83)
D	D	R	R	D	1	35,5 (6,5)
D	D	R	R	R	17	34,5 (5,5)
D	R	R	R	R	4	34,75 (5,75)
D	R	D	R	D	7	36,86 (7,86)
D	R	D	R	R	1	36,0 (7,0)
R	D	D	D	R	1	39,0 (10)
R	D	D	R	R	1	35,0 (6,0)
R	D	R	D	R	1	38,5 (9,5)
Наиболее позднеспелые образцы						
D	D	R	D	R	6	53,33 (24,33)
R	D	R	D	D	2	55,0(26,0)
R	D	D	D	R	1	52,0 (23,0)
R	–	R	D	R	1	61,0 (32,0)
Озимые образцы						
D	D	R	D	R	6	–
D	D	R	D	–	1	–
D	D	–	R	R	1	–
R	D	R	D	R	1	–
R	R	R	D	D	1	–

Примечание: D – доминантный аллель; R – рецессивный аллель; прочерк – фрагмент не амплифицировался

Note: D – dominant allele; R – recessive allele; dash – the fragment was not amplified

предыдущих исследованиях этот показатель составлял 29% для местных ячменей из Дагестана (Abdullaev et al., 2017) и 9% для сортов ярового ячменя, допущенных к использованию в России и Беларуси (Zlotina et al., 2013). Результаты нашего исследования плохо согласуются с ранее полученными данными (Turner et al., 2005; Zlotina et al., 2013), демонстрирующими связь раннего колошения ячменя при длинном дне с наличием аллеля *Ppd-H1*, носителями которого являются 6 из 10 изученных нами позднеспелых образцов.

Установлено, что аллель *Ppd-H2* определяет быстрое колошение ячменя при коротком дне, а в рецессивном состоянии вызывает задержку колошения (Casao et al., 2011). Среди изученной выборки ячменей из стран Восточной Азии 37 образцов имеют аллель *Ppd-H2*, 12 несут *ppd-H2* (см. табл. 5) и 2 оказались гетерогенными.

Наиболее распространено сочетание аллелей *Ppd-H1*/*Ppd-H2* (64,7%). Ранее показано (Zlotina et al., 2013), что районированные в различных климатических зонах России сорта ячменя с доминантными аллелями *Ppd-H1* и *Ppd-H2* достоверно опережают другие генотипы по скорости развития и являются скороспелыми при возделывании в условиях длинного дня северо-запада России. Настоящее исследование показало, что сочетание аллелей *Ppd-H1*/*Ppd-H2* не может быть диагностическим для выявления скороспелых в условиях Санкт-Петербурга форм ячменя, так как является наиболее распространенным и среди поздних генотипов (см. табл. 5). В то же вре-

мя 12 скороспелых форм ячменя (23,5% от числа изученных) имеют комбинацию аллелей *Ppd-H1/ppd-H2*, которая практически не встречается среди поздних и озимых образцов (см. табл. 5.) Три скороспелых образца (к-3513, к-6992, к-12291) несут аллели *ppd-H1/Ppd-H2.* Носители рецессивных аллелей *ppd-H1/ppd-H2* среди скороспелых генотипов не обнаружены.

Тип развития *H. vulgare* детерминируется тремя парами генов: *VRN-H1*, *VRN-H2*, *VRN-H3*, которые контролируют необходимость растений в яровизации для перехода к колошению и таким образом принимают участие в регулировании скорости развития растений.

Выявили 11 групп образцов с различными аллельными комбинациями генов *Ppd* и *VRN* (см. табл. 5). Пять образцов характеризовались уникальным сочетанием аллелей, 14 форм образовали 4 небольшие группы (по 2–5 образцов), 24 изученные формы распределились в две большие группы с комбинацией доминантных и рецессивных аллелей «DD-RRR» (*Ppd-H1Ppd-H2vrn-H1vrn-H2vrn-H3*) и «DR-DRD» (*Ppd-H1ppd-H2Vrn-H1vrn-H2Vrn-H3*), представленные 17 и 7 образцами соответственно. Гетерогенными по одному и более аллелям оказались 8 образцов ячменя. Отметим, что наличие рецессивных аллелей *vrn-H1* и *vrn-H2* характерно для образцов ячменя с типом развития «двуручка». Генотипы с подобным сочетанием аллелей генов *VRN* демонстрируют зимостойкость и не требуют обязательной яровизации (Muñoz-Amatriaín et al., 2020; Fernández-Calleja et al., 2021).

В работе М. М. Злотиной с коллегами (Zlotina et al., 2013) генотипы, несущие одинаковые аллели генов *Ppd-H1* и *Ppd-H2* и имеющие аллельные комбинации *Vrn-H1vrn-H2Vrn-H3* (DRD), переходили к колошению раньше, чем генотипы с другим сочетанием аллелей генов *VRN*. Среди образцов нашей выборки данное сочетание имели 7 скороспелых форм. Данная комбинация аллелей *VRN* отсутствует среди поздних генотипов ячменя, но имеется у среднеспелого, допущенного к выращиванию на северо-западе России сорта ‘Белогорский’ (табл. 6). Отметим, что группы образцов из нашей выборки с иными сочетаниями аллелей *VRN* выколашивались немного раньше, чем с *Vrn-H1vrn-H2Vrn-H3* (см. табл. 6); при этом многие из них, за исключением *Vrn-H1vrn-H2vrn-H3* (DRR), в исследовании М. М. Злотиной с соавторами (Zlotina et al., 2013) не были идентифицированы.

Таблица 6. Характеристика коллекционных образцов ячменя из стран Восточной Азии по фотопериодической чувствительности (Санкт-Петербург, Пушкин; 2021–2022 гг.)

Table 6. Characterization of barley accessions from East Asian countries according to their photoperiod sensitivity (Pushkin, St. Petersburg; 2021–2022)

№ по каталогу ВИР	Образец	Происхождение	Период «всходы – колошение», сут.		T2 – T1	$К_{фпч}$	Аллельное состояние генов *Ppd* и *VRN*
			T1	T2			
2765	**Местный**	**Япония**	**35,9 ± 0,45**	**42,7 ± 0,47**	**6,8**	**1,19**	–*
3320	Местный	Китай	38,0 ± 0,53	46,8 ±0,83	8,8	1,23	DD/R-RRR**
3446	**Местный**	**Китай**	**34,5 ± 0,92**	**39,0 ± 1,09**	**4,5**	**1,13**	–
3513	Местный	Китай	37,2 ± 0,83	54,1 ± 3,53	16,9	1,45	RD-DDR
3945	Местный	Китай	39,5 ± 0,76	54,1 ± 1,20	14,6	1,37	DD-DDR
3952	Местный	Монголия	37,0 ± 0,26	45,4 ± 0,58	8,4	1,23	R/DD/R-DRD
3996	Местный	Монголия	38,7 ± 0,63	53,1 ± 1,37	14,4	1,34	–
4034	Местный	Монголия	39,6 ± 0,81	57,0	17,4	1,44	DR-DRD
6992	**Местный**	**Япония**	**38,6 ± 0,50**	**46,5 ± 1,98**	**7,9**	**1,20**	**RD-RDR**
11605	Местный	Япония	37,7 ± 0,37	56,2 ± 0,93	18,5	1,43	–
12223	**‘Ychang’**	**Китай**	**36,9 ± 1,39**	**36,9 ± 0,59**	**0,0**	**1,00**	–
12245	‘Kiangsu’	Китай	36,4 ± 0,20	45,2 ± 1,10	8,8	1,24	–
12246	Местный	Китай	35,7 ± 1,44	47,4 ± 2,12	11,7	1,33	DD-RDR
12272	‘Shantung’	Китай	33,3 ± 0,84	47,4 ± 2,31	14,1	1,42	DD-RRR
12287	Местный	Китай	47,9 ± 2,49	62,6 ± 3,70	14,7	1,31	–
12291	**Местный**	**Китай**	**38,8 ± 1,31**	**46,3 ± 1,74**	**7,5**	**1,19**	**RD-DRR**
12302	Vaughn	Китай	39,7 ± 1,70	55,6 ± 5,31	15,9	1,40	DD-DR/DR
15582	Местный	Китай	35,6 ± 0,48	44,0 ± 0,86	8,4	1,24	DD-RDR
15813	Местный	Китай	39,3 ± 0,63	59,0 ± 2,47	19,7	1,50	DR-DRD

Таблица 6. Окончание
Table 6. The end

№ по каталогу ВИР	Образец	Происхождение	Период «всходы – колошение», сут.		T2 – T1	$К_{фпч}$	Аллельное состояние генов *Ppd* и *VRN*
			T1	T2			
15827	Местный	Китай	36,9 ± 0,84	66,1 ± 3,08	29,2	1,79	DD/R-DRD
15849	Местный	Китай	38,7 ± 1,67	54,7 ± 2,94	16,0	1,41	DR-DRD
15878	**Местный**	**Китай**	**34,6 ± 0,47**	**40,3 ± 0,69**	**5,7**	**1,16**	**DD-R/DRR**
15894	Местный	Китай	33,3± 0,84	44,0 ± 2,29	10,7	1,32	DD-DDR
18440	**Местный**	**Китай**	**32,8 ± 0,77**	**36,8 ± 0,70**	**4,0**	**1,12**	**DD-RRR**
18442	Местный	Китай	33,0 ± 0,31	42,6 ± 1,02	9,6	1,29	DD-RRR
18451	Местный	Китай	31,5 ± 0,27	42,8± 2,82	11,3	1,36	DD-RRR
19000	'La-sa-paj-cin-kye'	Китай	31,4 ± 0,20	45,3 ± 4,84	13,9	1,44	DD-RRR
19001	'Lasa-dzhi-cin-kye'	Китай	32,6 ± 0,53	46,2 ± 3,03	13,6	1,42	DD-RRR
19494	**'Mie'**	**Япония**	**34,0 ± 0,47**	**40,0 ± 1,81**	**6,0**	**1,18**	–
19522	F'ukumugi'	Япония	33,4 ± 0,16	41,2 ± 1,04	7,8	1,23	DD-RRR
20247	**'Aizu N4'**	**Япония**	**31,9 ± 0,35**	**38,9 ± 0,61**	**7,0**	**1,22**	**DD-RRR**
20297	'Jukiwarimugi'	Япония	34,5 ± 1,34	45,5 ± 1,85	11,0	1,32	DD-RRR
21439	'Akimakishibari'	Япония	34,4 ± 0,40	50,3 ± 1,27	15,9	1,46	DR-RRR
21706	**Местный**	**Монголия**	**34,3 ± 1,48**	**3,69 ± 1,06**	**2,6**	**1,08**	**DD-RRR**
22093	'Baitori'	Япония	32,6± 0,62	46,9 ± 1,50	14,3	1,44	DD-DDR
22440	**'KOS'**	**Япония**	**34,4 ± 0,34**	**38,8 ± 0,76**	**4,4**	**1,13**	–
22747	Местный	Китай	37,5 ± 0,76	59,3 ± 3,09	21,8	1,58	DR-DRD
25586	'Suwon 29'	Япония	33,3 ± 0,33	40,6 ± 0,99	7,3	1,22	–
25592	'Aizu'	Япония	33,1 ± 0,30	36,2 ± 0,87	3,1	1,09	–
25604	'Hoho'	Япония	35,2 ± 0,29	41,5 ± 1,04	6,3	1,17	–
27076	**'Mihogooruden'**	**Япония**	**32,1 ± 1,02**	**36,8 ± 0,20**	**4,7**	**1,15**	**DD-RRR**
30259	**'Misato Golden'**	**Япония**	**31,8 ± 0,29**	**36,5 ± 0,69**	**4,7**	**1,16**	**DD-RRR**
30263	**'Smoath Awn'**	**Япония**	**33,4 ± 0,70**	**39,3 ± 0,68**	**5,9**	**1,18**	**DR-RRR**
30849	**C 226 ZDM 1422**	**Китай**	**31,5 ± 0,17**	**36,5 ± 0,17**	**5,0**	**1,16**	**DD-RRR**
'Mari' **(контроль)**		Швеция	38,4 ± 0,69	39,4 ± 0,57	1,0	1,03	RR-RRD
'Kinai 5' **(контроль)**		Япония	35,0 ± 0,15	36,9 ± 0,41	1,9	1,05	RD-DRR
'Белогорский' **(допущен к выращиванию)**		Россия	39,6 ± 0,40	59,0 ± 1,80	19,4	1,49	RR-DRD

Примечание: T1 и T2 – продолжительность периода «всходы – колошение» (сут.) у растений ячменя, выращенных соответственно в условиях длинного естественного и короткого (12-часового) дня; T2 – T1 – задержка колошения растений ячменя на коротком дне по сравнению с длинным (сут.); $К_{фпч}$ = T2/T1 – коэффициент фотопериодической чувствительности; * – идентификация аллелей не проводилась; ** – гетерогенный образец

Note: T1 – T2 means the duration of the germination-to-heading period (days) in barley plants grown under long-day (natural) and short-day (12 hours) conditions, respectively; T2 – T1 is the heading delay in barley plants under short days compared to long days; $К_{фпч}$ = T2/T1 is the photoperiod sensitivity coefficient; * – allele identification was not performed; ** – heterogeneous accession

Носители аллельной комбинации *vrn-H1Vrn-H2vrn-H3* являются озимыми (восприимчивыми к яровизации), тогда как остальные аллельные комбинации этих трех генов ассоциированы с «яровым» типом развития (Takahashi, Yasuda, 1971). В нашем исследовании самую скороспелую группу составили три яровых образца, которые имели данное сочетание (RDR) *VRN*-генов, а также несли доминантные аллели *Ppd* (см. табл. 5). Ранее нами было изучено аллельное состояние генов *VRN* у 151 ярового образца ячменя из Дагестана, среди которых «озимую» комбинацию *vrn-H1Vrn-H2vrn-H3* имели 99 яровых генотипов. Доля доминантных аллелей *Vrn-H1* и *Vrn-H3* у местных форм была невелика и резко возрастала среди яровых селекционных линий и сортов (Abdullaev et al., 2017). По всей видимости, в процессе селекции происходит замещение рецессивного аллеля *vrn-H1* на доминантный, что также подтверждается исследованиями М. М. Злотиной с соавторами (Zlotina et al., 2013), в которых при изучении 91 районированного в различных климатических зонах России сорта ярового ячменя лишь один имел аллель *vrn-H1*.

Молекулярно-генетический анализ аллельного состояния генов *Ppd* и *VRN* позднеспелых и озимых образцов показал, что у ячменей данных групп наиболее распространено сочетание «DD-RDR», которое имели и три яровых скороспелых генотипа (к-12246, к-15582, к-15950). В свою очередь, среди поздних и с озимым типом развития образцов отсутствуют генотипы с наиболее распространенными у скороспелых при весеннем посеве форм комбинациями аллелей *Ppd* и *VRN*: «DD-RRR», «DR-DRD», «DD-DDR» и «DR-RRR». Полученные результаты могут свидетельствовать о возможной диагностической ценности выявленных нами сочетаний аллелей для идентификации скороспелых в условиях продолжительного дня ячменей.

Оценка фотопериодической чувствительности

В результате оценки на фотопериодической площадке 44 скороспелых в поле образцов ячменя выделили 15 источников слабой ФПЧ: к-2765, к-3446, к-6992, к-12223, к-12291, к-15878, к-18440, к-19494, к-20247, к-21706, к-22440, к-27076, к-30259, к-30263, к-30849 (см. табл. 6), у которых $К_{фпч}$ не превышал 1,20. Особо следует отметить образец к-12223 из Китая, характеризующийся скороспелостью и отсутствием чувствительности к фотопериоду.

Не выявлено строгой закономерности слабой реакции растений на продолжительность дня и аллельными комбинациями генов *Ppd* и *VRN*. Так, шесть характеризующихся слабой реакцией на фотопериод образцов ячменя (к-18440, к-20247, к-21706, к-27076, к-30259 и к-30849) имеют наиболее распространенное среди изученных форм сочетание аллелей *Ppd-H1Ppd-H2vrn-H1vrn-H2vrn-H3* (DD-RRR). Данное сочетание аллелей *Ppd* и *VRN* несут также 7 чувствительных образцов. Три генотипа, слабо реагирующих на продолжительность дня (к-6992, к-12291, к-30263), имели комбинации «RD-RDR», «RD-DRR» и «DR-RRR» соответственно (см. табл. 6). Возможным объяснением выявленных противоречий может являться влияние генов *eps* или других неизвестных генетических систем.

Заключение

В условиях длинного дня северо-запада России исследовали 660 коллекционных образцов ячменя из Восточноазиатского центра разнообразия по адаптивно важным признакам. В результате двухлетнего (2021–2022 гг.) полевого изучения выделены 19 образцов, характеризующихся высокой скоростью развития.

С использованием молекулярных маркеров изучили аллельное состояние генов *Ppd* и *VRN*, участвующих в контроле продолжительности межфазного периода «всходы – колошение» у 51 скороспелого образца ячменя. Ячмени из стран Восточной Азии характеризуются большим количеством образцов с доминантным аллелем *Ppd-H1* (90,2% изученных форм), который контролирует более раннее колошение ячменя на длинном дне. Три образца (к-3513, к-6992, к-12291) имеют рецессивный аллель *ppd-H1*, обусловливающий задержку колошения в условиях длинного дня. Среди ячменей из нашей выборки 37 образцов (72,5%) имеют аллель *Ppd-H2*, определяющий более раннее колошение при коротком дне. Наиболее распространено сочетание аллелей *Ppd-H1/Ppd-H2* (64,7,8%), которое, как показало наше исследование, не является диагностическим для выявления скороспелых в условиях длинного дня форм ячменя. В то же время 12 изученных скороспелых генотипов (23,5%) имеют комбинацию *Ppd-H1/ppd-H2*, не встречающуюся среди поздних и озимых образцов.

Выявили 11 групп с различными аллельными комбинациями генов *Ppd* и *VRN*. Пять образцов характеризовались уникальным сочетанием аллелей, 14 форм образовали 4 небольшие группы (по 2–5 образцов), 24 изученные формы распределились в две большие группы с комбинацией доминантных и рецессивных аллелей «DR-DRD» (*Ppd-H1ppd-H2Vrn-H1vrn-H2Vrn-H3*) и «DD-RRR» (*Ppd-H1Ppd-H2vrn-H1vrn-H2vrn-H3*), представленные 7 и 17 образцами соответственно. Среди поздних и озимых образцов ячменя отсутствуют наиболее распространенные у скороспелых форм комбинации аллелей «DD-RRR», «DR-DRD», «DD-DDR» и «DR-RRR», что может свидетельствовать о диагностической ценности выявленных нами сочетаний аллелей *Ppd* и *VRN* при идентификации скороспелых в условиях продолжительного дня генотипов.

В результате оценки фотопериодической чувствительности 44 образцов ячменя, характеризующихся высокой скоростью развития в полевых условиях, выделили 15 источников слабой ФПЧ. Образец к-12223 из Китая отличается скороспелостью и отсутствием реакции на продолжительность фотопериода. Показано аллельное состояние генов *Ppd* и *VRN* у генотипов, слабо реагирующих на продолжительность дня.

Таким образом, выявлено внутривидовое разнообразие ячменей из стран Восточной Азии по адаптивно важным признакам. Идентифицирован ценный материал, характеризующийся скороспелостью и слабой реакцией на фотопериод. Выделены генотипы, несущие адаптивно ценные комбинации аллелей *Ppd-H1*, *Ppd-H2*, *VRN-H1*, *VRN-H2* и *VRN-H3*, необходимые для создания экологически пластичных конкурентоспособных сортов с высоким адаптивным потенциалом.

References / Литература

Abdullaev R.A. Genetic diversity of local barley forms from Dagestan in adaptively important traits (Geneticheskoye raznoobraziye mestnykh form yachmenya iz Dagestana po adaptivno vazhnym priznakam) [dissertation]. St. Petersburg: VIR; 2015. [in Russian] (Абдуллаев Р.А. Генетическое разнообразие местных форм ячменя из Дагестана

по адаптивно важным признакам: дис. ... канд. биол. наук. Санкт-Петербург: ВИР; 2015).

Abdullaev R.A., Alpatieva N.V., Karabitsina Yu.I., Zveinek I.A., Batasheva B.A., Anisimova I.N. et al. Allelic diversity of the *Ppd* and *Vrn* genes involved in control of the duration of shooting-earing stage in Dagestanian barley accessions. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2017;178(4):56-65. [in Russian] (Абдуллаев Р.А., Алпатьева Н.В., Карабицина Ю.И., Звейнек И.А., Баташева Б.А., Анисимова И.Н. и др. Аллельное разнообразие участвующих в контроле продолжительности периода всходы-колошение генов *Ppd* и *VRN* у образцов ячменя из Дагестана. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2017;178(4):56-65). DOI: 10.30901/2227-8834-2017-4-56-65

Abdullaev R.A., Lukina K.A., Batasheva B.A., Kovaleva O.N., Radchenko E.E. Genetic diversity of barley accessions from East Asian countries in terms of resistance to powdery mildew. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding.* 2023;184(3):178-186. [in Russian] (Абдуллаев Р.А., Лукина К.А., Баташева Б.А., Ковалева О.Н., Радченко Е.Е. Генетическое разнообразие образцов ячменя из стран Восточной Азии по устойчивости к мучнистой росе. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(3):178-186). DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-178-186

Anisimova I.N., Alpatieva N.V., Abdullaev R.A., Karabitsina Yu.I., Kuznetsova E.B. Screening of plant genetic resources with the use of DNA markers: basic principles, DNA isolation, PCR setup, agarose gel electrophoresis: (guidelines). E.E. Radchenko (ed.). St. Petersburg: VIR; 2018. [in Russian] (Анисимова И.Н., Алпатьева Н.В., Абдуллаев Р.А., Карабицина Ю.И., Кузнецова Е.Б. Скрининг генетических ресурсов растений с использованием ДНК-маркеров: основные принципы, выделение ДНК, постановка ПЦР, электрофорез в агарозном геле: (методические указания) / под ред. Е.Е. Радченко. Санкт-Петербург: ВИР; 2018). DOI: 10.30901/978-5-905954-81-8

Batakova O.B. Some results of studies of the spring barley vegetative period duration in the Arkhangelsk region. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2009;165:169-173. [in Russian] (Батакова О.Б. Некоторые итоги по изучению длины вегетационного периода в условиях Архангельской области. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2009;165:169-173).

Batasheva B.A. Prospects for increasing barley productivity in Dagestan based on the study of the genepool (Perspektivy povysheniya produktivnosti yachmenya v Dagestane na osnove izucheniya genofonda) [dissertation]. St. Petersburg: VIR; 2012. [in Russian] (Баташева Б.А. Перспективы повышения продуктивности ячменя в Дагестане на основе изучения генофонда: дис. … докт. биол. наук. Санкт-Петербург: ВИР; 2012).

Benlioglu B., Bilir M., Akdogan G., Ahmed H.A.A., Ergun N., Aydogan S. et al. Phenotypic characterization of two-row barley (*Hordeum vulgare* L. ssp. *vulgare*) germplasm conserved in Osman Tosun Genebank of Türkiye by multivariate analysis model. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2025;72(2):1567-1584 DOI: 10.1007/s10722-024-02032-0

Casao M.C., Karsai I., Igartua E., Gracia M.P., Veisz O., Casas A.M. Adaptation of barley to mild winters: a role for *PPDH2*. *BMC Plant Biology*. 2011;11:164. DOI: 10.1186/1471-2229-11-164

Cockram J., Jones H., Leigh F.J., O'Sullivan D., Powell W., Laurie D.A. et al. Control of flowering time in temperate cereals: genes, domestication, and sustainable productivity. *Journal of Experimental Botany*. 2007;58(6):1231-1244. DOI: 10.1093/jxb/erm042

Cockram J., Norris C., O'Sullivan D.M. PCR-based markers diagnostic for spring and winter seasonal growth habit in barley. *Crop Science*. 2009;49(2):403-410. DOI: 10.2135/cropsci2008.07.0398

Distelfeld A., Li C., Dubcovsky J. Regulation of flowering in temperate cereals. *Current Opinion in Plant Biology*. 2009;12(2):178-184. DOI: 10.1016/j.pbi.2008.12.010

Dorokhov D.B., Klocke E. A rapid and economic technique for RAPD analysis of plant genomes. *Russian Journal of Genetics*. 1997;33(4):443-450.

Fernández-Calleja M., Casas A.M., Igartua E. Major flowering time genes of barley: allelic diversity, effects, and comparison with wheat. *Theoretical and Applied Genetics*. 2021;134(7):1867-1897. DOI: 10.1007/s00122-021-03824-z

Jones H., Leigh F.J., Mackay I., Bower M.A., Smith L.M.J., Charles M.P. et al. Population based resequencing reveals that the flowering time adaptation of cultivated barley originated east of the Fertile Crescent. *Molecular Biology and Evolution*. 2008;25(10):2211-2219. DOI: 10.1093/molbev/msn167

Karsai I., Szűcs P., Mészáros K., Filichkina T., Hayes P.M., Skinner J.S. et al. The *Vrn-H2* locus is a major determinant of flowering time in a facultative × winter growth habit barley (*Hordeum vulgare* L.) mapping population. *Theoretical and Applied Genetics*. 2005;110(8):1458-1466. DOI: 10.1007/s00122-005-1979-7

Kikuchi R., Kawahigashi H., Ando T., Tonooka T., Handa H. Molecular and functional characterization of PEBP genes in barley reveal the diversification of their roles in flowering. *Plant Physiology*. 2009;149(3):1341-1353. DOI: 10.1104/pp.108.132134

Knüpffer H., Terentyeva I., Hammer K., Kovaleva O., Sato K. Ecogeographical diversity – a Vavilovian approach. In: R. von Bothmer, K. Sato, H. Knüpffer, T. van Hintum (eds). *Developments in Plant Genetics and Breeding*. *Vol. 7. Diversity in Barley (Hordeum vulgare)*. Amsterdam: Elsevier 2003. p.53-76. DOI: 10.1016/S0168-7972(03)80006-3

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).

Laurie D.A., Pratchett N., Bezant J.H., Snape J.W. RFLP mapping of five major genes and eight quantitative trait loci controlling flowering time in a winter × spring barley (*Hordeum vulgare* L.) cross. *Genome*. 1995;38(3):575-585. DOI: 10.1139/g95-074

Lekeš J., Bareš I., Foral A., Odignal V., Ružička F., Bobek M., Trofimovskaya A., Lukyanova M., Korneychuk V., Ilyina N., Yarosh N. International COMECON list of descriptors for the genus *Hordeum* L. (subgen. *Hordeum*). Leningrad: VIR; 1983. [in Russian] (Лекеш Я., Бареш И., Форал А., Одигнал И., Ружичка Ф., Бобек М., Трофимовская А., Лукьянова М., Корнейчук В., Ильина Н., Ярош Н. Международный классификатор СЭВ рода *Hordeum* L. (подрод *Hordeum*). Ленинград: ВИР; 1983).

Loskutov I.G., Kovaleva O.N., Blinova E.V. (comp.). Guidelines for the study and preservation of the world collection of barley and oats (Metodicheskiye ukazaniya po izucheniyu i sokhraneniyu mirovoy kollektsii yachmenya i ovsa). I.G. Loskutov (ed.). 4th ed. St. Petersburg: VIR; 2012. [in Russian] (Методические указания по изуче-

нию и сохранению мировой коллекции ячменя и овса / сост. И.Г. Лоскутов, О.Н. Ковалева, Е.В. Блинова; под ред. И.Г. Лоскутова. 4-е изд. Санкт-Петербург: ВИР; 2012).

Loskutov I.G., Kovaleva O.N., Blinova E.V., Safonova I.V. Guidelines for the study and conservation of the global collection of barley, oat, and rye. St. Petersburg: VIR; 2024. [in Russian] (Лоскутов И.Г., Ковалева О.Н., Блинова Е.В., Сафонова И.В. Методические указания по изучению и сохранению мировой коллекции ячменя, овса и ржи. Санкт-Петербург: ВИР; 2024). DOI: 10.30901/978-5-907780-09-5

Lukyanova M.V. Agrobiological study of a collection of oats and barley for use as green fodder (Agrobiologicheskoye izucheniye kollektsii ovsa i yachmenya v tselyakh ispolzovaniya na zeleny korm) [dissertation]. Leningrad: VIR; 1958. [in Russian] (Лукьянова М.В. Агробиологическое изучение коллекции овса и ячменя в целях использования на зеленый корм: дис. … канд. биол. наук. Ленинград: ВИР; 1958).

Muñoz-Amatriaín M., Hernandez J., Herb D., Baenziger P.S., Bochard A.M., Capettini F. et al. Perspectives on low temperature tolerance and vernalization sensitivity in barley: prospects for facultative growth habit. *Frontiers in Plant Science*. 2020;11:585927. DOI: 10.3389/fpls.2020.585927

Pourkheirandish M., Hensel G., Kilian B., Senthil N., Chen G., Sameri M. et al. Evolution of the grain dispersal system in barley. *Cell*. 2015;162(3):527-539. DOI: 10.1016/j.cell.2015.07.002

Radchenko E.E., Abdullaev R.A., Akimova D.E., Zajtseva I.Yu. Genetic diversity of barley accessions from Mongolia for greenbug resistance. *Ecological Genetics*. 2022;20(3):175-182. [in Russian] (Радченко Е.Е., Абдуллаев Р.А., Акимова Д.Е., Зайцева И.Ю. Генетическое разнообразие образцов ячменя из Монголии по устойчивости к обыкновенной злаковой тле. *Экологическая генетика*. 2022;20(3):175-182). DOI: 10.17816/ecogen105875

Schreiber M., Wonneberger R., Haaning A.M., Coulter M., Russell J., Himmelbach A. et al. Genomic resources for a historical collection of cultivated two-row European spring barley genotypes. *Scientific Data*. 2024;11(1):66. DOI: 10.1038/s41597-023-02850-4

Takahashi R., Yasuda S. Genetics of earliness and growth habit in barley. In: R.A. Nilan (ed.). *Barley Genetics II: Proceedings of the. 2nd International Barley Genetics Symposium*. Pullman, WA: Washington State University; 1971. p.388-408.

Turner A., Beales J., Faure S., Dunford R.P., Laurie D.A. The pseudo-response regulator *Ppd-H1* provides adaptation to photoperiod in barley. *Science*. 2005;310(5750):1031-1033. DOI: 10.1126/science.1117619

Vavilov N.I. World resources of cereals, leguminous seed crops and flax, and their utilization in plant breeding. Agro-ecological survey of the principal field crops. Moscow; Leningrad: USSR Academy of Sciences; 1957. [in Russian] (Вавилов Н.И. Мировые ресурсы сортов хлебных злаков, зерновых бобовых, льна и их использование в селекции. Опыт агроэкологического обозрения важнейших полевых культур. Москва; Ленинград: АН СССР; 1957).

Verstegen H., Köneke O., Korzun V., von Broock R. The world importance of barley and challenges to further improvements. In: J. Kumlehn, N. Stein (eds). *Biotechnology in Agriculture and Forestry. Vol. 69. Biotechnological Approaches to Barley Improvement*. Berlin; Heidelberg: Springer; 2014. p.3-19. DOI: 10.1007/978-3-662-44406-1_1

Weather and Climate. Reference and Information Portal (Pogoda i klimat. Spravochno-informatsionny portal): [website]. [in Russian] (Погода и климат. Справочно-информационный портал: [сайт]). URL: https://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=26063 [дата обращения: 03.09.2025].

Yan L., Fu D., Li C., Blechl A., Tranquilli G., Bonafede M. et al. The wheat and barley vernalization gene *VRN3* is an orthologue of *FT*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2006;103(51):19581-19586. DOI: 10.1073/pnas.0607142103

Zakhrabekova S., Gough S.P., Braumann I., Müller A.H., Lundqvist J., Ahmann K. et al. Induced mutations in circadian clock regulator *Mat-a* facilitated short-season adaptation and range extension in cultivated barley. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2012;109(11):4326-4331. DOI: 10.1073/pnas.1113009109

Zaushintsena A.V. Genetic sources for the realization of main trends in barley breeding in Siberia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2009;165:101-105. [in Russian] (Заушинцена А.В. Генетические источники для реализации основных направлений селекции ячменя в Сибири. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2009;165:101-105).

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).

Zohary D., Hopf M., Weiss E. Domestication of plants in the Old World: the origin and spread of domesticated plants in Southwest Asia, Europe, and the Mediterranean basin. 4th ed. Oxford: Oxford University Press; 2012. DOI: 10.1093/acprof:osobl/9780199549061.001.0001

Zveinek I.A., Abdullaev R.A., Batasheva B.A., Radchenko E.E. The effect of responses to vernalization, photoperiodism, and earliness per se of barley accessions from Dagestan on the duration of the period from shooting to heading. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021;182(2):24-33. [in Russian] (Звейнек И.А., Абдуллаев Р.А., Баташева Б.А., Радченко Е.Е. Влияние реакции на яровизацию, чувствительности к фотопериоду и собственно скороспелости на продолжительность развития образцов ячменя из Дагестана от всходов до колошения. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2021;182(2):24-33). DOI: 10.30901/2227-8834-2021-2-24-33

Zveinek I.A., Abdullaev R.A., Matvienko I.I., Radchenko E.E., Alpatieva N.V. Identification of the *eam8* allele associated with photoperiod insensitivity in barley accessions from Japan. *Ecological Genetics*. 2022;20(2):101-109. [in Russian] (Звейнек И.А., Абдуллаев Р.А., Матвиенко И.И., Радченко Е.Е., Алпатьева Н.В. Идентификация аллеля *eam8*, ассоциированного со слабой чувствительностью к фотопериоду, у образцов ячменя из Японии. *Экологическая генетика*. 2022;20(2):101-109). DOI: 10.17816/ecogen106033

Информация об авторах

Ренат Абдуллаевич Абдуллаев, 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, abdullaev.1988@list.ru, https://orcid.org/0000-0003-1021-7951

Белахан Абдурашидовна Баташева, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Дагестанская опытная станция – филиал ВИР, 368612 Россия, Республика Дагестан, Дербентский район, с. Вавилово, kostek-kum@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-2266-281X

Ольга Николаевна Ковалева, 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, o.kovaleva@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-3990-6526

Зоя Андреевна Щедрина, ведущий специалист, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, z.shedrina@vir.nw.ru, https://orcid.org/0009-0001-2245-9395

Евгений Евгеньевич Радченко, 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, eugene_radchenko@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-3019-0306

Information about the authors

Renat A. Abdullaev, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, abdullaev.1988@list.ru, https://orcid.org/0000-0003-1021-7951

Belahan A. Batasheva, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Dagestan Experiment Station – branch of VIR, Vavilovo Village, Derbentsky District 368612, Republic of Dagestan, Russia, kostek-kum@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-2266-281X

Olga N. Kovaleva, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, o.kovaleva@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-3990-6526

Zoya A. Shchedrina, Leading Specialist, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, z.shedrina@vir.nw.ru, https://orcid.org/0009-0001-2245-9395

Evgeny E. Radchenko, Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, eugene_radchenko@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-3019-0306

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 07.11.2025; одобрена после рецензирования 30.12.2025; принята к публикации 30.01.2026.
The article was submitted on 07.11.2025; approved after reviewing on 30.12.2025; accepted for publication on 30.01.2026.

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

Научная статья
УДК 633.171
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o6

CC BY

Характеристика и подбор SSR-маркеров для оценки генетического разнообразия образцов проса посевного (*Panicum miliaceum* L.)

Д. Х. Архестова[1, 2], А. Д. Хаудов[1, 2], Т. В. Кулемина[3]

[1] *Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, Нальчик, Россия*

[2] *Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, Институт сельского хозяйства, Нальчик, Россия*

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

Автор, ответственный за переписку: Татьяна Владимировна Кулемина, kkku@ya.ru

Актуальность. Просо посевное (*Panicum miliaceum* L.) – цельнозерновая культура, богатая питательными веществами, с коротким вегетационным периодом, что делает его удобным для выращивания в различных агроэкологических зонах. Изучение генетического разнообразия проса в коллекциях важно для сохранения генетических ресурсов и селекции. SSR-маркеры благодаря высокому полиморфизму широко используются для анализа генетического материала растений.

Материалы и методы. На основе литературных данных отобраны 7 SSR-маркеров и оценена их возможность выявлять генетическую вариабельность 13 образцов проса коллекции ВИР из разных агроэкологических зон методом ПЦР с последующим электрофорезом в агарозном геле. Геномную ДНК выделяли из этиолированных проростков модифицированным CTAB-методом. Рассчитаны параметры генетической вариабельности: число аллелей (Na), эффективное число аллелей (Ne), ожидаемая гетерозиготность (He) и полиморфное информационное содержание (PIC). Матрицу генетических расстояний строили на основе коэффициента Нея. Анализ главных координат (PCoA) и филогенетическое дерево (UPGMA) построены с использованием программы DARwin 6.0.21.

Результаты. Из отобранных семи SSR-маркеров четыре (GB-PMM-073, GB-PMM-085, GB-PMM-121, GB-PMM-126) выявляли полиморфизм анализируемых образцов, остальные три (SSR 28, SSR 109, SSR 332) были мономорфны. Всего выявлено 19 аллельных вариантов, среднее число аллелей на один SSR-локус составило 2,7, среднее значение PIC – 0,471. Два маркера (GB-PMM-121, GB-PMM-073) продемонстрировали высокий уровень информативности (PIC > 0,6). Полученные ПЦР-продукты 13 образцов проса секвенировали, что позволило выявить дополнительные аллельные варианты в структуре последовательностей.

Заключение. Предварительные результаты позволяют рекомендовать выявленные полиморфные маркеры для оценки и генотипирования коллекций проса и характеристики селекционного материала.

Ключевые слова: праймер, амплификация, генетическое разнообразие, генотипирование

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану Кабардино-Балкарского научного центра РАН по теме НИР № 125032604435-7 «Методы молекулярной идентификации феногенетических процессов в интересах повышения продуктивности селекций растений и животных» и тематическому плану ВИР по проекту № 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».

Для цитирования: Архестова Д.Х., Хаудов А.Д., Кулемина Т.В. Характеристика и подбор SSR-маркеров для оценки генетического разнообразия образцов проса посевного (*Panicum miliaceum* L.). *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(1):217-227. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o6

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

© Архестова Д.Х., Хаудов А.Д., Кулемина Т.В., 2026

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

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o6

Characterization and selection of SSR markers for assessing the genetic diversity of proso millet (*Panicum miliaceum* L.) accessions

Dzhenet Kh. Arkhestova[1, 2], Aliy-bek D. Khaudov[1, 2], Tatiana V. Kulemina[3]

[1] *Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Nalchik, Russia*

[2] *Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Agriculture, Nalchik, Russia*

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

Corresponding author: Tatiana V. Kulemina, kkku@ya.ru

Background. Proso millet (*Panicum miliaceum* L.) is a nutrient-rich whole-grain crop with a short growing season, making it suitable for cultivation across diverse agro-ecological zones. Studying the genetic diversity of millet in germplasm collections is essential for genetic resources conservation and breeding practice. Due to their high polymorphism, SSR markers are widely used for the analysis of plant genetic material.

Materials and methods. Seven SSR markers were selected on the basis of published data, and their ability to detect genetic variability was assessed in 13 millet accessions from the VIR collection. The accessions originating from different agro-ecological zones were studied with PCR, followed by agarose gel electrophoresis. Genomic DNA was extracted from etiolated seedlings using a modified CTAB method. Genetic variability parameters were calculated: number of alleles (Na), effective number of alleles (Ne), expected heterozygosity (He), and polymorphic information content (PIC). Nei's coefficient was used to construct a genetic distance matrix. Principal coordinate analysis (PCoA) and a phylogenetic tree (UPGMA) were made using DARwin 6.0.21.

Results. Out of the 7 selected SSR markers, four (GB-PMM-073, GB-PMM-085, GB-PMM-121, and GB-PMM-126) revealed polymorphism in the analyzed accessions, while the remaining three (SSR 28, SSR 109, and SSR 332) were monomorphic. A total of 19 allelic variants were detected. The average number of alleles per SSR-locus was 2.7, and the mean PIC value was 0.471. Two markers (GB-PMM-121, and GB-PMM-073) demonstrated a high level of informativeness (PIC > 0.6). The PCR products obtained from the 13 millet accessions were sequenced, making it possible to identify additional allelic variants in the sequence structure.

Conclusion. Preliminary results suggest that the identified polymorphic markers can be recommended for assessing and genotyping millet germplasm collections, and for characterization of breeding material.

Keywords: primer, amplification, genetic diversity, genotyping

Acknowledgments: the work was done within the framework of the state tasks according to the thematic plan of the Kabardin-Balkar Scientific Center of the RAS, Research Topic No. 125032604435-7 "Methods of molecular identification of phenogenetic processes to enhance the productivity of plant and animal breeding", and the thematic plan of VIR, 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".

For citation: Arkhestova D.Kh., Khaudov A.D., Kulemina T.V. Characterization and selection of SSR markers for assessing the genetic diversity of proso millet (*Panicum miliaceum* L.) accessions. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(1):217-227. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o6

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Просо посевное (*Panicum miliaceum* L. сем. Poaceae) является представителем мелкозернистых злаков и считается одной из самых древних культур, используемых человеком (Hunt et al., 2008; Lu et al., 2009). *P. miliaceum* – самоопыляющееся аллотетраплоидное растение с короткой продолжительностью вегетационного периода, что делает его удобным для выращивания в различных климатических условиях. Несмотря на то что урожайность зерна проса уступает популярным культурам, таким как пшеница и рис, просо обладает высокой приспособленностью к полузасушливым условиям окружающей среды, что делает его важным сельскохозяйственным растением для этих регионов (Bhat et al., 2019). Исследования показывают, что одомашнивание проса произошло примерно 10 000 лет назад, преимущественно на территории Центральной и Восточной Азии (Hunt et al., 2008; Lu et al., 2009), что говорит о его использовании в аграрной деятельности человека на протяжении длительного времени. В настоящее время мировое производство проса остается на достаточно высоком уровне и занимает значительные площади. На территории Российской Федерации посевные площади зерновых культур занимают 44,94 млн га, из них просо – 295 тыс. га (0,66%). Большая часть площадей приходится на Приволжский федеральный округ (73,3%), а также на Южный (15,5%) и Центральный (5,4%) федеральные округа. Лидером по посевным площадям проса является Саратовская область, где сконцентрировано более 28% (85 тыс. га) посевов (FAO, 2024).

Зерно проса обыкновенного является ценной пищевой культурой благодаря богатому химическому составу. В зерне проса содержится от 10 до 15% белка, 55–65% крахмала, более 5% жиров, а также 0,3–0,9% каротиноидов и незаменимые аминокислоты, что обуславливает его значимость в качестве продовольственного и кормового ресурса (Kulemina et al., 2010; Balli et al., 2023).

Изучение генетического разнообразия видов сельскохозяйственных растений, представленных в коллекциях генетических банков, крайне важно не только для описания и сохранения генетических ресурсов, но и для использования в селекционных программах, направленных на улучшение и ускорение получения новых сортов. В то время как традиционные методы селекции, основанные на фенотипическом отборе, остаются не менее важными, молекулярно-генетические подходы предоставляют прямой доступ к генотипу растений, позволяя более эффективно и точно оценивать и использовать генетическое разнообразие (Agarwal et al., 2008).

В настоящее время для характеристики генетической вариабельности образцов коллекций генбанков применяются различные системы молекулярного маркирования, так как именно молекулярные маркеры позволяют напрямую оценивать полиморфизм, связанный с генами, отвечающими за конкретные агрономические признаки (Elshire et al., 2011; Souza et al., 2017; Liu et al., 2018). Данные, полученные на основе молекулярного анализа, могут быть использованы для выявления доноров важных хозяйственно ценных признаков, маркирования локусов и отдельных генов, генотипирования сортов, линий и гибридов сельскохозяйственных растений, а также подбора родительских форм для скрещиваний. Одними из наиболее эффективных и широко используемых систем молекулярного маркирования являются микросателлитные SSR-маркеры (Simple Sequence Repeats). Это связано с тем, что SSR обладают высокой воспроизводимостью, кодоминантным наследованием, мультиаллельностью, экономичностью и равномерным распределением по всему геному растения (Agarwal et al., 2008; Liu et al., 2018). Более того, SSR-маркеры высокополиморфны, что делает их незаменимыми для изучения генетического материала коллекций сельскохозяйственных растений (Abdi et al., 2019; Zargar et al., 2023). SSR-маркеры, благодаря их высокой специфичности и чувствительности, широко использовались для анализа генетического разнообразия различных культур, включая злаковые (например, пшеница, рис, овес) (Temnykh et al., 2000; Kalia et al., 2011; Cuevas, Prom, 2020).

Несмотря на огромный научный и практический потенциал молекулярных маркеров возможности их применения для анализа коллекций проса посевного до сих пор ограничены. В основном использующиеся SSR-маркеры для анализа генома проса были разработаны на основе анализа геномных ресурсов родственных злаков (Hunt et al., 2008; Cho et al., 2010).

Целью данной работы стала оценка эффективности SSR-маркеров для выявления геномной вариабельности и генотипирования выборки из 13 образцов *P. miliaceum* коллекции ВИР.

Материалы и методы

Растительный материал и экстракция ДНК

Для исследования отобрано 13 образцов *P. miliaceum* коллекции ВИР из различных географических регионов (табл. 1). Выбор образцов основывался на их генетическом разнообразии и репрезентативности для популяции *P. miliaceum*.

Геномную ДНК каждого образца выделяли из пяти 10-дневных этиолированных проростков с использованием модифицированного CTAB-метода (Filyushin et al., 2023).

Для микросателлитного анализа отобрано 7 SSR-маркеров, выбор которых основывался на литературных данных, свидетельствующих об их эффективности в выявлении полиморфизма у проса и родственных злаков (Cho et al., 2010; Kalia et al., 2011; Liu et al., 2018; Zargar et al., 2023). ПЦР проводили в реакционной смеси объемом 15 мкл, содержащей: ~100 нг геномной ДНК, 1х ПЦР-буфер, 2,5 мМ $MgCl_2$, 0,2 мМ dNTP, 0,1 ед. Taq-полимеразы («Диалат ЛТД», Россия), 1,0 мкМ каждого из SSR-праймеров (табл. 2). Реакцию проводили в термоциклере BioRad T100 Thermal Cycler. Условия реакции: первичная денатурация матрицы при 95°C для 5 мин, 35 циклов денатурации при 95°C в течение 1 мин, отжиг SSR-праймера при температуре 55–60°C (см. табл. 2), характерной для каждого праймера, в течение 1 мин и элонгация при 72°C в течение 1 мин; заключительный этап элонгации – при 72°C в течение 7 мин.

Продукты амплификации разделяли электрофорезом в 3-процентном агарозном геле в 1х TBE буфере с последующим окрашиванием бромистым этидием. Фрагменты визуализировали на УФ-трансиллюминаторе и документировали с использованием системы BioRad Gel Doc XR + Imaging System (BioRad, США). Длины амплифицированных SSR-фрагментов оценивали с использованием 1 kb и 100 bp ДНК-маркера (Fermentas, Литва).

Секвенирование фрагментов

Секвенирование проведено для более детального изучения аллельных вариантов микросателлитных ло-

Таблица 1. Анализируемые образцы проса посевного
Table 1. The analyzed proso millet accessions

№ по каталогу ВИР	Название	Место происхождения	№ по каталогу ВИР	Название	Место происхождения
10211	'Ильиновское'	Саратовская обл.	10475	местное	Таджикистан
10483	'Россиянка'	Самарская обл.	10344	'Саратовское 10'	Саратовская обл.
10215	'Крестьянка'	Самарская обл.	507	местное	Китай
10311	'Вельсовское'	Орловская обл.	10476	местное	Таджикистан
10323	'Спутник'	Орловская обл.	10343	'Золотистое'	Саратовская обл.
919	местное	Приморский край	10378	Ld 2544	Орловская обл.
10458	'Гомельское'	Беларусь			

Таблица 2. Праймеры SSR-маркеров
Table 2. Primers of SSR markers

SSR-маркер	Последовательность SSR-повтора	Праймеры	Tm (°C) отжига
GB-PMM-073	$(TC)_n$, $(CGTG)_n$	F: GCTCTCACCGTCTGATCG R: CGCATTCTCTTCCCCTTT	55
GB-PMM-085	$(AGG)_n(AGC)(AGG)_n$	F: CAGCCCATCACACTCGAT R: CTTCTTCGTCGTCCCTCC	55
GB-PMM-121	$(AT)_n$ $(GTAT)_n$	F: GGACATACGCATGGTGGT R: ACGATCGAATGAGCGAGA	55
GB-PMM-126	$(GAA)_n(GA)_n$	F: CTTCCATAGGGTGCCTCC R: CATCGCAATTGGGAAAGA	55
SSR 28	$(GCT)_n$	F: GTTTCGCAGCTGCAATTTTT R:CAGCTTCCTCAACGAGATCC	60
SSR 109	$(GGC)_n$	F: AGTGGATGGAGGTGGAGATG R:TGCTCCGTACACACTCTGCT	59,5
SSR 332	$(GGAAG)_n$	F: AATTGCCCGATACTCACGAC R:TGAGTACTGAGCCCGTTCG	60

кусов и выявления возможных различий в структуре повторов, которые могли быть не детектированы при фрагментном анализе в агарозном геле. Для определения нуклеотидной последовательности амплифицированных фрагментов полученные амплификаты очищены с использованием набора для очистки ПЦР-фрагментов (ZimoClean kit, USA) и взяты на секвенирование. Очищенные фрагменты секвенировали с использованием тех же прямых праймеров, что и для амплификации, с помощью системы Big-dye (Applied Biosystems) на ABI 310 Capillary DNA Analyzer (Центр «Биоинженерия» РАН).

Статистический анализ

На основе данных SSR-анализа рассчитаны следующие параметры генетической вариабельности: число аллелей (Na), эффективное число аллелей (Ne), ожидаемая гетерозиготность (He) и полиморфное информационное содержание (PIC) с использованием Microsoft Excel 2016. Расчеты проводили согласно описанным методикам (Nei, 1973).

Матрицу генетических расстояний строили на основе коэффициента Нея. Анализ главных координат (PCoA) выполняли с использованием программы DARwin 6.0.21. Филогенетическое дерево строили методом невзвешенной парной группировки со средним арифметическим (UPGMA) с применением программы DARwin 6.0.21.

Результаты и обсуждение

На основе литературных данных отобраны 7 полиморфных SSR-маркеров (GB-PMM-073, GB-PMM-085, GB-PMM-121, GB-PMM-126, SSR 28, SSR 109, SSR 332) для оценки генетического разнообразия 13 образцов проса посевного (*P. miliaceum*), различающихся по происхождению, полиморфизм которых гипотетически может быть различим в агарозном геле (см. табл. 2).

Из семи использованных SSR-маркеров четыре (GB-PMM-073, GB-PMM-085, GB-PMM-121 и GB-PMM-126) выявляли вариабельность у анализируемых образцов проса, в то время как другие три маркера (SSR 28, SSR 109,

SSR 332) аллельного полиморфизма в анализируемой выборке не выявили (рис. 1).

В общей сложности выявлено 19 аллелей с размерами амплифицированных фрагментов, варьирующимися от 194 до 320 пн. Максимальное число аллелей (6) определено для маркера GB-PMM-121, что соответствует его высокому значению PIC = 0,667 (табл. 3).

Ранее при SSR-анализе 100 образцов проса были взяты 20 SSR-маркеров, использовавшиеся в работе M. Zargar с соавторами, включая SSR 109, который был высоко

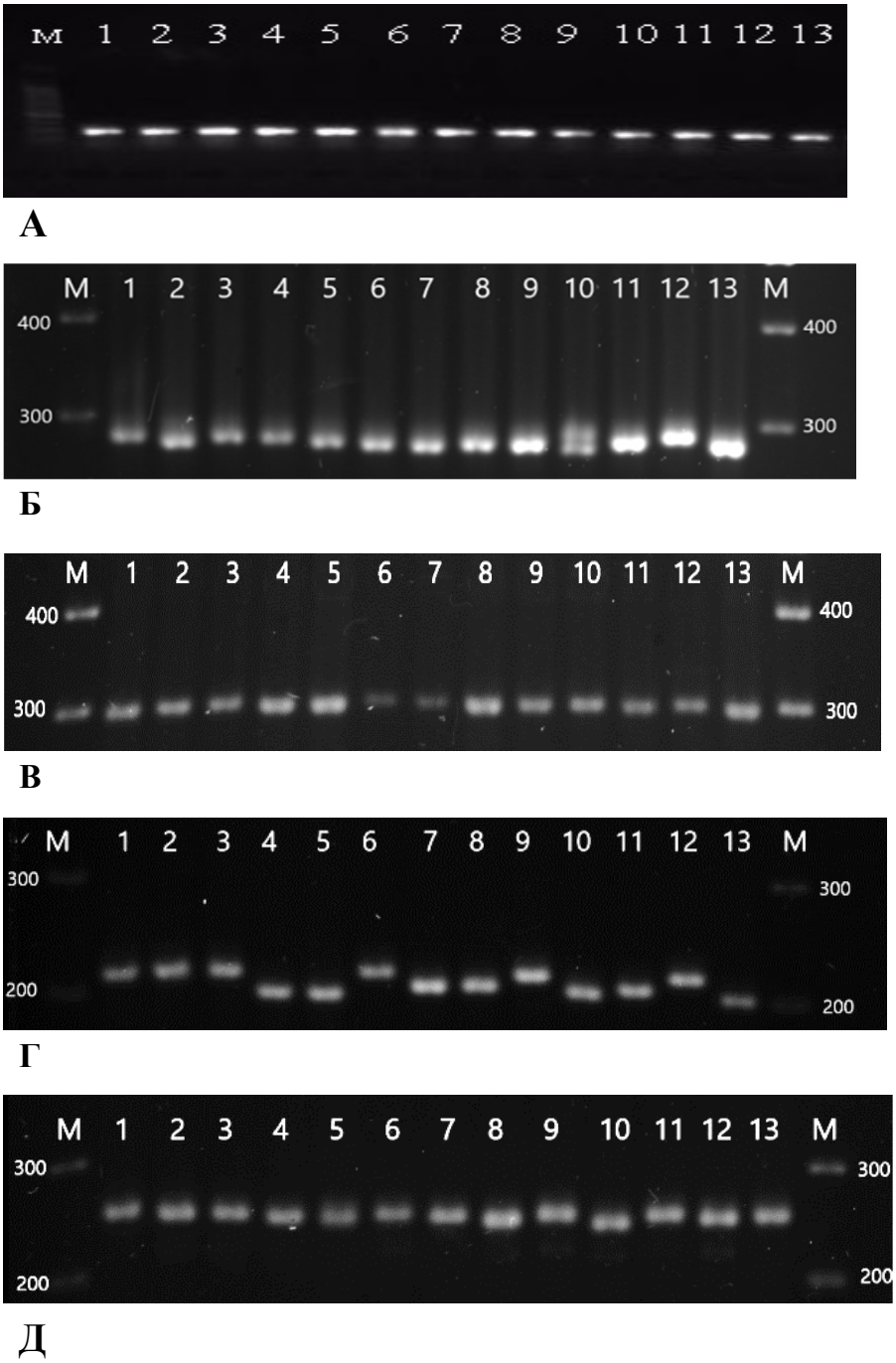


Рис. 1. Электрофореграмма продуктов амплификации ДНК 13 образцов *P. miliaceum* (3-процентный агарозный гель) с использованием праймеров SSR-локусов SSR 109 (А), GB-PMM-073 (Б), GB-PMM-085 (В), GB-PMM-121 (Г) и GB-PMM-126 (Д). 1 – к-10211, **2** – к-10483, **3** – к-10215, **4** – к-10311, **5** – к-10323, **6** – к-919, **7** – к-10458, **8** – к-10475, **9** – к-10344, **10** – к-507, **11** – к-10476, **12** – к-10343, **13** – к-10378; **M –** маркер 1 kb ДНК (Fermentas, Литва)

Fig. 1. Electrophorogram of DNA amplification products from 13 *P. miliaceum* accessions (3% agarose gel) using primers of the SSR loci 109 (A), GB-PMM-073 (Б), GB-PMM-085 (B), GB-PMM-121 (Г), and GB-PMM-126 (Д). 1 – к-10211, **2** – к-10483, **3** – к-10215, **4** – к-10311, **5** – к-10323, **6** – к-919, **7** – к-10458, **8** – к-10475, **9** – к-10344, **10** – к-507, **11** – к-10476, **12** – к-10343, **13** – к-10378; **M** – 1 kb DNA marker (Fermentas, Lithuania)

Таблица 3. **Характеристика изученных SSR-локусов у образцов *Panicum miliaceum* L.**
Table 3. **Characteristics of the SSR loci used for genotyping *Panicum miliaceum* L. accessions**

SSR-локус	Na	He	PIC	Ne
GB-PMM-073	4	0,571	0,604	3,32
GB-PMM-085	3	0,505	0,323	3,38
GB-PMM-121	6	0,694	0,667	4,58
GB-PMM-126	3	0,374	0,295	2,45
SSR 28	1	0	0	1
SSR 109	1	0	0	1
SSR 332	1	0	0	1

полиморфен (Zargar et al., 2023). Однако данный маркер не выявил полиморфизма в нашей выборке.

Среднее число аллелей на один SSR-локус в нашем исследовании составило 2,71, что несколько меньше, чем количество аллелей, выявленное у семи образцов, проанализированных с помощью 11 SSR-маркеров (3,4) в других исследованиях вариабельности проса (Flajsman et al., 2019), и намного ниже, чем для широко изучаемых злаков, таких как рис, где средние значения этого показателя находятся в пределах 8–10 (Temnykh et al., 2000). Однако важно отметить, что выборка анализируемых нами образцов *P. miliaceum* включала ограниченное количество генотипов (13), что могло повлиять на общее распределение аллелей. Недостаток мономорфных SSR-маркеров ограничил наш анализ в плане полного охвата возможного генетического разнообразия, однако он также подчеркивает необходимость дальнейшей разработки новых праймеров для этой культуры.

Оценка SSR-локусов проведена с использованием нескольких ключевых параметров: числа аллелей (Na), числа эффективных аллелей (Ne), ожидаемой гетерозиготности (He) и полиморфного информационного содержания (PIC) (см. табл. 3). В контексте анализа видовой вариабельности и популяционных исследований значение PIC считается одним из ключевых показателей (Nei, 1973). Среднее значение PIC, сгенерированное праймерами SSR-маркеров, было умеренным и составило 0,471, что соответствует предыдущим исследованиям других авторов (Flajsman et al., 2019; Zargar et al., 2023). Два использованных маркера – GB-PMM-121 (PIC = 0,667) и GB-PMM-073 (PIC = 0,604) – продемонстрировали высокий уровень информативности, превышая значение 0,5, что подтверждает их применимость для исследований генетического разнообразия образцов проса (см. табл. 3). У остальных двух полиморфных маркеров (GB-PMM-085 и GB-PMM-126) значения PIC были ниже (0,323 и 0,295 соответственно). Мономорфные маркеры, как и ожидалось, не обладали информативностью (PIC = 0), что исключило их из дальнейшего анализа.

Остальные показатели генетической вариабельности характеризовались схожим уровнем значений (Na = 2,7; He = 0,306) относительно результатов, полученных в другом исследовании с использованием аналогичных маркеров (Zargar et al., 2023). Похожие значения были определены в исследованиях генетического разнообразия местных сортов сорго (Mohammadi, Prasanna, 2003). Средние значения Ne = 2,39 также свидетельствует о наличии значимой, но невысокой структурной вариабельности. Это может быть связано с особенностями рассматриваемой культуры, так как просо часто выращивается в изолированных и небольших популяциях, что способствует увеличению уровня генетического дрейфа и снижению гетерогенности (Gami et al., 2021).

Ранее неоднократно показано, что секвенирование SSR-маркеров выявляет гораздо больше различий, чем фрагментный анализ (Suvi et al., 2019). В подтверждение и в дополнение к результатам фрагментного анализа полученные ампликоны тринадцати образцов проса секвенированы с использованием прямого праймера. Секвенирование предпринято для более детального изучения аллельных вариантов микросателлитных локусов и выявления возможных различий в структуре повторов, которые могли быть не обнаружены при фрагментном анализе на агарозном геле.

Анализ полученных нуклеотидных последовательностей с использованием маркеров SSR 28, SSR 332 и SSR 109, не выявляющих полиморфизма у анализируемой выборки, также не показал различий. Так, для локуса SSR 28 у всех 13 образцов был выявлен аллель $(GCT)_3$ и $(GGAAG)_3$ для маркера SSR 332. В случае маркера SSR 109 количество повторов было одинаково $(GGC)_3$, однако в случае образца к-10475 (Таджикистан) один из повторов был вырожден (рис. 2).

Нуклеотидные последовательности образцов проса, амплифицированные с использованием праймеров SSR-маркеров, которые выявляли вариабельность анализируемых образцов на геле, ожидаемо показывали большие отличия, чем различия в длине фрагментов, выявляемых на агарозном геле. Так, анализ локуса GB-PMM-121 с микросателлитом (AT)n(GTAT)n позволил детектировать 9 различных аллельных вариантов (рис. 3). При этом выявились различия как в количестве единиц повтора (AT) ($(AT)_5$ и $(AT)_6$), так и повтора GTATn, где n могло быть равно 5, 6–9, 12, 15. Кроме того, у ряда аллелей GB-PMM-121 между двумя типами повторов выявлялись вставочные последовательности длиной от 3 до 12 нп, различающиеся по составу (см. рис. 3). Таким образом, данный микросателлит имеет формулу (AT)n X(GTAT)n, где X – возможные вставочные последовательности.

Аналогично были выявлены семь вариантов GB-PMM-126, и аллели различались количеством повторов и $(AAG)_{5–6}$, и $(GA)_{19–21}$. У микросателлита GB-PMM-073 детектированы повторы $(CT)_{16–22}$ (см. рис. 3).

Микросателлиты, использованные в исследовании, могут быть рекомендованы для анализа коллекции *P. miliaceum* (см. рис. 3).

Данные SSR-маркирования использовали для определения генетической вариабельности и филогенетических

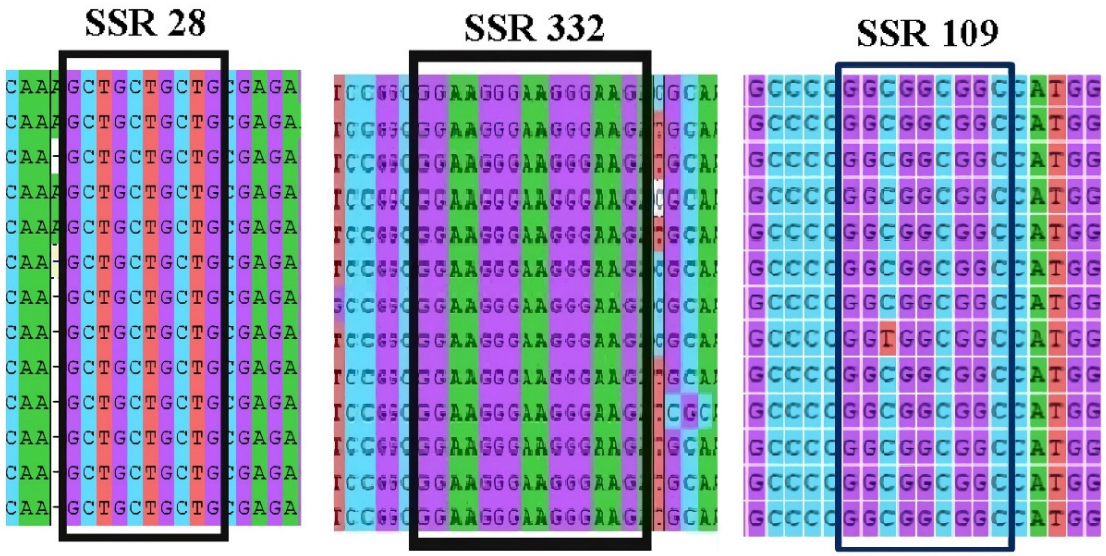


Рис. 2. **Фрагменты нуклеотидных последовательностей, полученные для мономорфных локусов SSR 28, SSR 332 и SSR 109 у исследованных образцов проса посевного**

Fig. 2. **Fragments of nucleotide sequences obtained for monomorphic SSR markers SSR 28, SR 332, and SR 109 in the studied proso millet accessions**

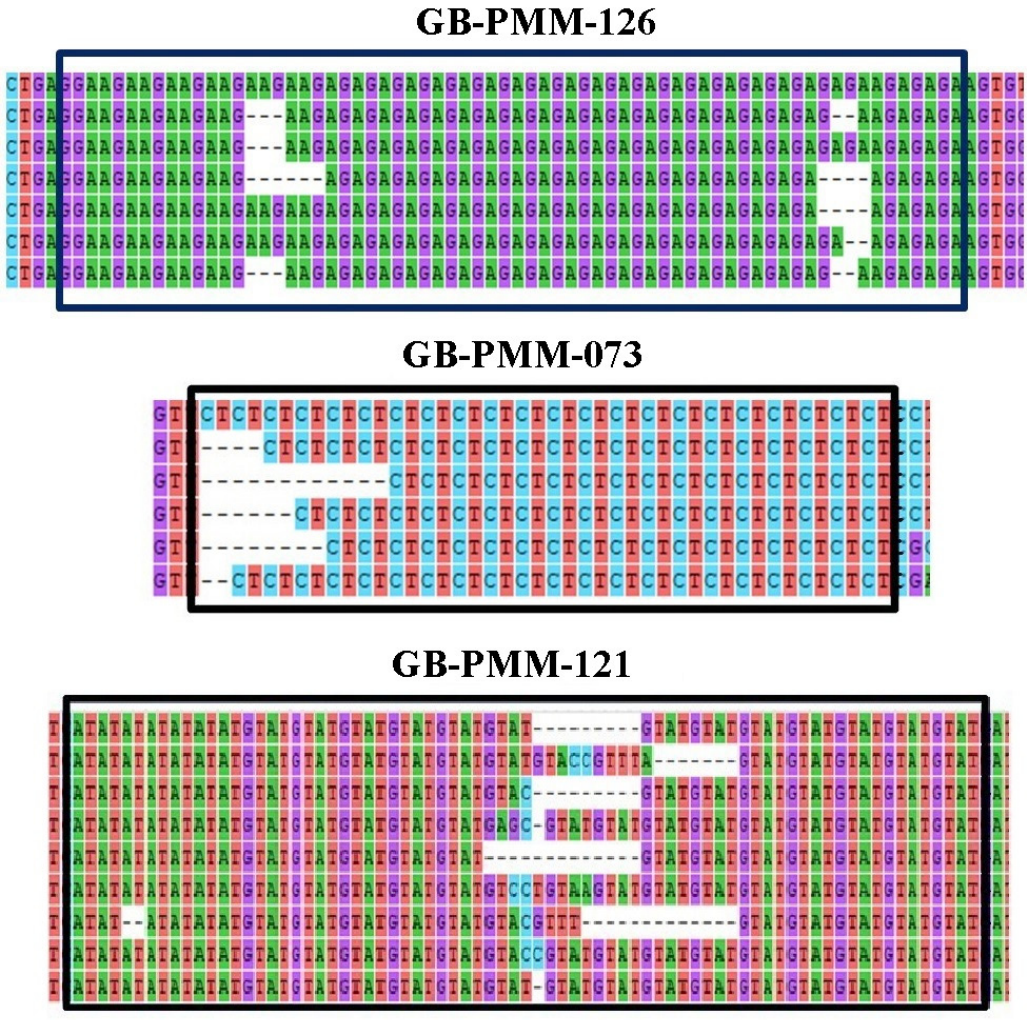


Рис. 3. **Аллельные варианты полиморфных микросателлитных локусов GB-PMM-126, GB-PMM-073 и GB-PMM-121, выявленные у исследованных образцов проса посевного**

Fig. 3. **Allelic variants of the polymorphic microsatellite loci GB-PMS-121, GB-PM-073, and GB-PMS-126, identified in the studied proso millet accessions**

отношений у 13 образцов *P. miliaceum* из различных эколого-географических зон. С использованием коэффициента генетического расстояния Нея рассчитаны попарные генетические расстояния (GD) между изученными образцами (Electronic Supplementary Materials, Suppl.)[1]. Значения GD варьировали от 0,143 до 0,571, что в целом свидетельствует об умеренном уровне генетической дифференциации. Наиболее удаленные генотипы (GD = 0,571) представлены образцами из географически отдаленных зон: к-10475 (Таджикистан) и к-10211, или к-10483 (Саратовская область), что подтверждает влияние географической изоляции на формирование генетической структуры популяции. Но при этом для некоторых образцов из разных регионов – к-919 (Приморский край) и к-10344 (Самарская область) – значения генетических расстояний были низкими (GD = 0,143). В целом для анализируемой выборки проса посевного средние генетические расстояния составили 0,407. Сравнивая наши данные с результатами других исследований по злаковым культурам, можно отметить, что уровни генетических расстояний для *P. miliaceum* оказываются ниже, чем, например, для пшеницы, где значение GD может достигать 0,8 или выше (Gami et al., 2021). Это может быть связано с особенностями происхождения и выращивания проса, поскольку оно менее активно культивируется и подвергается селекции.

Кластерный анализ (UPGMA) (рис. 4) позволил выделить три основных кластера среди изученных образцов, что согласуется с результатами анализа на основе основных координат (PCoA) (рис. 5).

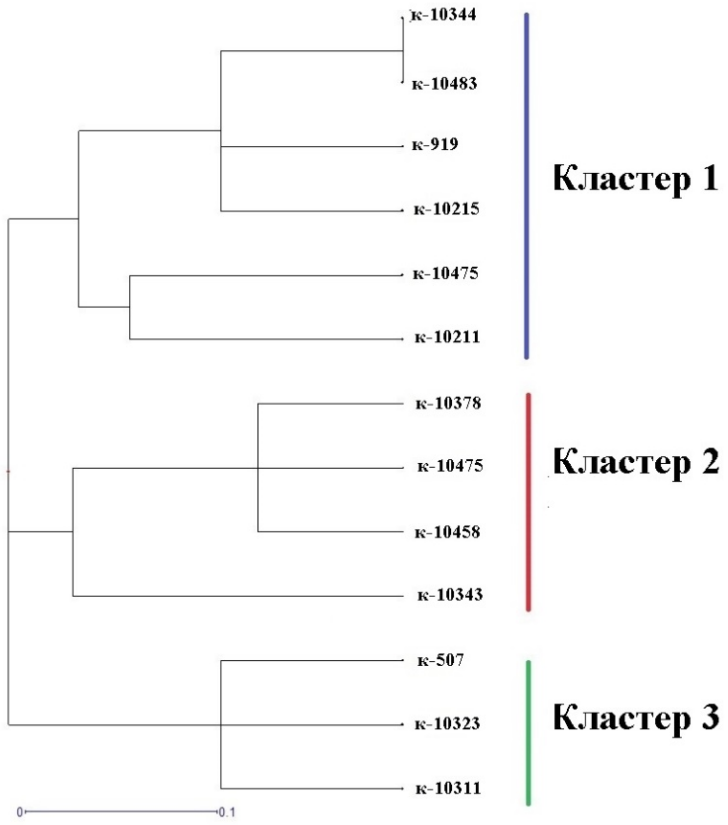


Рис. 4. Дендрограмма UPGMA, построенная на основе матрицы генетических расстояний Нея, полученных по данным SSR-анализа 13 образцов проса посевного

Fig. 4. The UPGMA dendrogram based on a matrix of Nei's genetic distances obtained from the SSR analysis of 13 proso millet accessions

Кластер 1 включил образцы из различных географических регионов: к-10344 и к-10211 (Саратовская область), к-10483 и к-10215 (Самарская область), к-919 (Приморский край) и к-10475 (Таджикистан). Кластер 2 объединил образцы к-10378 (Орловская область), к-10475 (Таджикистан), к-10458 (Беларусь) и к-10343 (Саратовская область). Кластер 3 состоял из образцов к-507 (Китай), к-10323 и к-10311 (Орловская область).

Оба метода анализа показали, что генотипы не разделяются строго по географическому или экологическому признакам. Например, в кластере 1 оказались сгруппированы образцы из географически удаленных регионов – Приморского края и европейской части России, а также Таджикистана.

Для полноты картины представляет интерес сравнение полученных данных с результатами нашего предыдущего исследования, включавшего этот же генетический материал, с использованием ISSR-маркеров (Arkhestova et al., 2024). В обоих исследованиях наблюдается сходная картина смешения образцов из разных географических регионов внутри кластеров, что подтверждает вывод об отсутствии строгой географической структурированности в изучаемой коллекции проса.

Ранее аналогичные результаты получили для риса и сорго, где также наблюдалась смешанность генетиче-

[1] Приложение представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o6 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o6

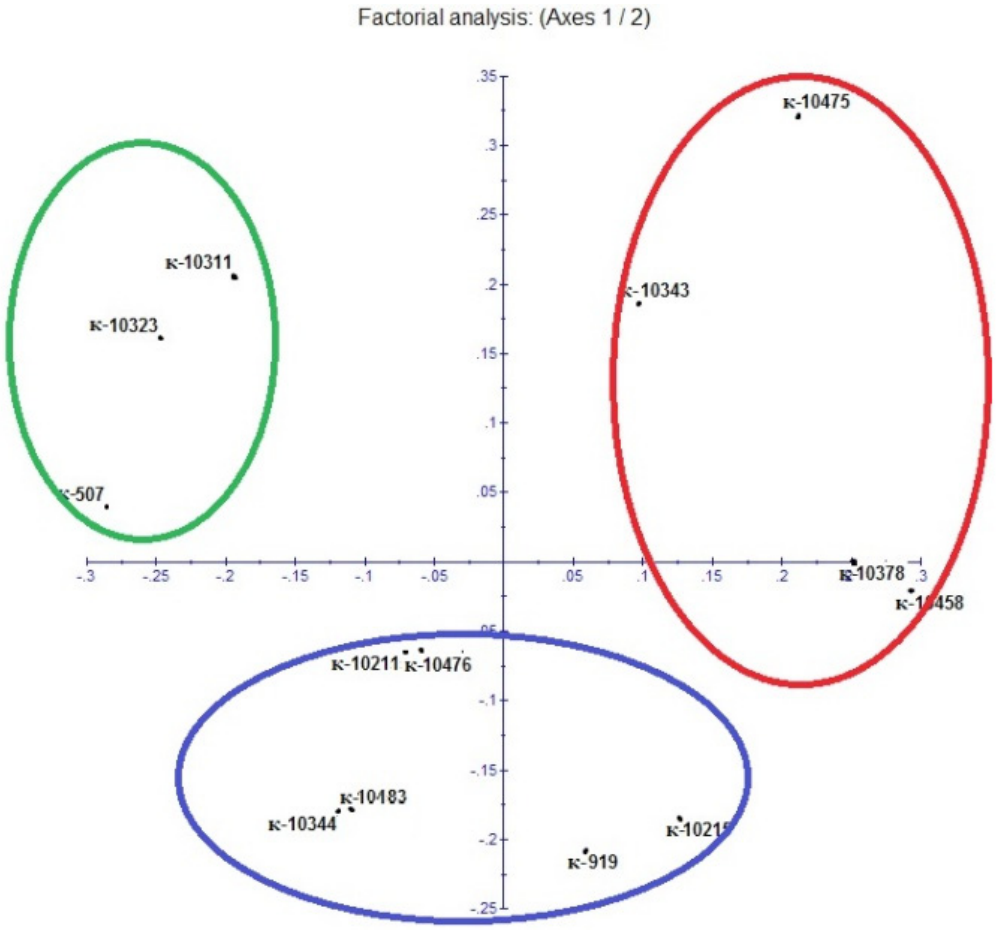


Рис. 5. График PCoA, построенный на основе матрицы генетических расстояний Нея, полученных по данным SSR-анализа 13 образцов проса посевного (образцы окрашены в соответствии с кластерами, выделенными на дендрограмме UPGMA на рисунке 4)

Fig. 5. The PCoA graph based on a matrix of Nei's genetic distances obtained by the SSR analysis of 13 proso millet accessions (accessions are encircled with different colors according to the clusters identified on the UPGMA dendrogram in Fig. 4)

ских групп, не соответствующих четкому географическому распределению (Cuevas, Prom, 2020). Это делает очевидным то, что отсутствие строгой географической структуры в генетическом разнообразии изученной выборки проса посевного может быть обусловлено комплексом факторов, включая как исторические пути распространения и обмена семенным материалом, так и адаптацию к сходным условиям среды в различных регионах.

Выводы

В рамках данной работы охарактеризована эффективность семи SSR-маркеров для оценки генетического разнообразия проса посевного с использованием выборки 13 образцов коллекции ВИР разного эколого-географического происхождения. Маркеры GB-PMM-073, GB-PMM-085, GB-PMM-121, GB-PMM-126 могут быть рекомендованы для определения геномной вариабельности образцов, представленных в коллекциях генбанков. Использование метода SSR-анализа позволило генотипировать 13 образцов *P. miliaceum*. Изученный полиморфизм образцов проса в сочетании с агрономическими и морфологическими характеристиками может быть использован в селекционных программах для подбора родительских форм при селекции новых сортов.

References / Литература

Abdi S., Dwivedi A., Shashi, Kumar S., Bhat V. Development of EST-SSR markers in *Cenchrus ciliaris* and their applicability in studying the genetic diversity and cross-species transferability. *Journal of Genetics*. 2019;98(4):101. DOI: 10.1007/s12041-019-1142-x

Agarwal M., Shrivastava N., Padh H. Advances in molecular marker techniques and their replications in plant sciences. *Plant Cell Reports*. 2008;27(4):617-631. DOI: 10.1007/s00299-008-0507-z

Arkhestova D.Kh., Yakhutlova A.A., Khaudov A.D., Sokurova L. Kh., Kulemina T.V. Effectiveness of ISSR markers for detecting genomic variability in *Panicum miliaceum* L. accessions. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(1):161-171. [in Russian] (Архестова Д.Х., Яхутлова А.А., Хаудов А.Д., Сокурова Л.Х., Кулемина Т.В. Эффективность ISSR-маркеров для выявления вариабельности генома образцов проса посевного (*Panicum miliaceum* L.). *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(1):161-171). DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-161-171

Balli D., Bellumori M., Masoni A., Moretta M., Palchetti E., Bertaccini B. et al. Proso millet (*Panicum miliaceum* L.) as alternative source of starch and phenolic compounds:

A study on twenty-five worldwide accessions. *Molecules*. 2023;28(17):6339. DOI: 10.3390/molecules28176339

Bhat S., Nandini C.A.V., Srinathareddy S., Jayarame G., Prabhakar K. Proso millet (*Panicum miliaceum* L.) – a climate resilient crop for food and nutritional security: A review. *Environment Conservation Journal*. 2019;20(3):113-124. DOI: 10.36953/ECJ.2019.20315

Cho Y.I., Chung J.W., Lee G.A., Ma K.H., Dixit A., Gwag J.G. et al. Development and characterization of twenty-five new polymorphic microsatellite markers in proso millet (*Panicum miliaceum* L.). *Genes and Genomics*. 2010;32(3):267-273. DOI: 10.1007/s13258-010-0007-8

Cuevas H.E., Prom L.K. Evaluation of genetic diversity, agronomic traits, and anthracnose resistance in the NPGS Sudan Sorghum Core collection. *BMC Genomics*. 2020;21(1):88. DOI: 10.1186/s12864-020-6489-0

Elshire R.J., Glaubitz J.C., Sun Q., Poland J.A., Kawamoto K., Buckler E.S. et al. A robust, simple genotyping-by-sequencing (GBS) approach for high diversity species. *PLoS One*. 2011;6(5):e19379. DOI: 10.1371/journal.pone.0019379

FAO. Millet in Russia (Proso Rossii). Moscow: FAO; 2024. [in Russian] (ФАО. Просо России. Москва: ФАО; 2024). DOI: 10.4060/cd0716ru

Filyushin M.A., Shchennikova A.V., Kochieva E.Z. Antocyanidin-3-*O*-glucosyltransferase genes in pepper (*Capsicum* spp.) and their role in anthocyanine biosynthesis. *Russian Journal of Genetics*. 2023;59(5):517-529. [in Russian] (Филюшин М.А., Щенникова А.В., Кочиева Е.З. Характеристика генов антоцианидин-3-*O*-глюкозилтрансфераз перца (*Capsicum* spp.) и их роль в биосинтезе антоцианов. *Генетика*. 2023;59(5):517-529). DOI: 10.31857/S0016675823050041

Flajsman M., Stajner N., Kocjan Acko D. Genetic diversity and agronomic performance of Slovenian landraces of proso millet (*Panicum miliaceum* L.). *Turkish Journal of Botany*. 2019;43(2):185-195. DOI: 10.3906/bot-1807-83

Gami P.B., Solanki S.D., Prajapati C.D., Patel M.S. Study of genetic architecture for yield related traits in pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.]. *Pharma Innovation*. 2021;10(12):128-133. DOI: 10.22271/tpi.2021.v10.i12b.9351

Hunt H.V, Vander Linden M., Liu X., Motuzaite-Matuzevicuite G., Colledge S., Jones M.K. Millets across Eurasia: chronology and context of early records of the genera *Panicum* and *Setaria* from archaeological sites in the Old World. *Vegetation History and Archaeobotany*. 2008;17 Suppl 1:5-18. DOI: 10.1007/s00334-008-0187-1

Kalia R.K., Rai M.K., Kalia S., Singh R., Dhawan A.K. Microsatellite markers: An overview of the recent progress in plants. *Euphytica*. 2011;177(3):309-334. DOI: 10.1007/s10681-010-0286-9

Kulemina T.V., Khoreva V.I., Shelenga T.V., Kurtseva A.F., Sidorenko V.S. The grain quality of milletlike cultures in conditions of the south Nonblack Earth Zone of Russia. *Agrarian Russia*. 2010;(1):19-23. [in Russian] (Кулемина Т.В., Хорева В.И., Шеленга Т.В., Курцева А.Ф., Сидоренко В.С. Биохимические показатели качества зерна просовидных культур в условиях юга Нечерноземной зоны РФ. *Аграрная Россия*. 2010;(1):19-23). DOI: 10.30906/1999-5636-2010-1-19-23

Liu S., Feuerstein U., Luesink W., Schulze S., Asp T., Studer B. et al. DArT, SNP, and SSR analyses of genetic diversity in *Lolium perenne* L. using bulk sampling. *BMC Genetics*. 2018;19(1):10. DOI: 10.1186/s12863-017-0589-0

Lu H., Zhang J., Liu K.B., Wu N., Li Y., Zhou K. et al. Earliest domestication of common millet (*Panicum miliaceum*) in East Asia extended to 10,000 years ago. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2009;106(18):7367-7372. DOI: 10.1073/pnas.0900158106

Mohammadi S.A., Prasanna B.M. Analysis of genetic diversity in crop plants – Salient statistical tools and considerations. *Crop Science*. 2003;43(4):1235-1248. DOI: 10.2135/cropsci2003.1235

Nei M. Analysis of gene diversity in subdivided populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 1973;70(12):3321-3323. DOI: 10.1073/pnas.70.12.3321

Souza C.P.F., Ferreira C., de Souza E.H., Neto A.R.S., Marconcini J.M., da Silva Ledo C.A. et al. Genetic diversity and ISSR marker association with the quality of pineapple fiber for use in industry. *Industrial Crops and Products*. 2017;104:263-268. DOI: 10.1016/j.indcrop.2017.04.059

Suvi W.T., Shimelis H.A., Laing M.D., Mathew I., Shayanowako A.I.T. Assessment of the genetic diversity and population structure of rice genotypes using SSR markers. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil and Plant Science*. 2019;70(1):76-86. DOI: 10.1080/09064710.2019.1670859

Temnykh S., Park W.D., Ayres N., Cartinhour S., Hauck N., Lipovich L. et al. Mapping and genome organization of microsatellite sequences in rice (*Oryza sativa* L.). *Theoretical and Applied Genetics*. 2000;100(5):697-712. DOI: 10.1007/s001220051342

Zargar M., Dyussibayeva E., Orazov A., Zeinullina A., Zhirnova I., Yessenbekova G. et al. Microsatellite-based genetic diversity analysis and population structure of proso millet (*Panicum miliaceum* L.) in Kazakhstan. *Agronomy*. 2023;13(10):2514. DOI: 10.3390/agronomy13102514

Информация об авторах

Дженет Хазреталиевна Архестова, младший научный сотрудник, Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, 360002 Россия, Нальчик, ул. Балкарова, 2, научный сотрудник, Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, Институт сельского хозяйства – филиал КБНЦ РАН, 360004 Россия, Нальчик, ул. Кирова, 224, khavpacheva.dzhenet@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1239-3641

Алий-Бек Данильбекович Хаудов, научный сотрудник, Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, 360002 Россия, Нальчик, ул. Балкарова, 2, научный сотрудник, Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, Институт сельского хозяйства – филиал КБНЦ РАН, 360004 Россия, Нальчик, ул. Кирова, 224, aliy-beck@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-5187-3229

Татьяна Владимировна Кулемина, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, kkku@ya.ru, https://orcid.org/0000-0002-5069-7390

Information about the authors

Dzhenet Kh. Arkhestova, Associate Researcher, Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2 Balkarova St., Nalchik 360002, Russia, Researcher, Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Agriculture – branch of the KBSC RAS, 224 Kirova St., Nalchik 360004, Russia, khavpacheva.dzhenet@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1239-3641

Aliy-bek D. Khaudov, Researcher, Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2 Balkarova St., Nalchik 360002, Russia, Researcher, Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Agriculture – branch of the KBSC RAS, 224 Kirova St., Nalchik 360004, Russia, aliy-beck@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-5187-3229

Tatiana V. Kulemina, Associate Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, kkku@ya.ru, https://orcid.org/0000-0002-5069-7390

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 27.07.2025; одобрена после рецензирования 20.10.2025; принята к публикации 06.11.2025.
The article was submitted on 27.07.2025; approved after reviewing on 20.10.2025; accepted for publication on 06.11.2025.

СИСТЕМАТИКА, ФИЛОГЕНИЯ И ГЕОГРАФИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 581.331.2
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o17

CC BY

Развитие пыльника и пыльцевого зерна у спонтанных естественных эгилопсно-пшеничных гибридов (*Aegilops biuncialis* × *Triticum* sp.)

А. А. Торшилова[1], Ж. В. Ивасенко[1], Г. Е. Титова[1], Н. Н. Чикида[2]

[1] *Ботанический институт им. В.Л. Комарова Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия*

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

Автор, ответственный за переписку: Алла Анатольевна Торшилова, phoenix62@binran.ru

Актуальность. Впервые на Дагестанской опытной станции ВИР получены плодовитые эгилопсно-пшеничные гибриды (СГ), материнской формой одного из которых является *Aegilops biuncialis* Vis. (геномной структуры UM). Данные гибриды нуждаются в анализе различных характеристик, в том числе эмбриологических, способствующих пониманию их природы, оценке репродуктивного потенциала и пополнению сведений по эмбриологии рода *Aegilops* L. Цель работы – выявление особенностей развития пыльника у двух линий эгилопсно-пшеничных гибридов в сравнении с их отцовской формой (*Triticum* L.).
Материалы и методы. Исследовали две линии (7 и 9) эгилопсно-пшеничных гибридов из коллекции ВИР с различной морфологией колоса. Растения выращивали на территории Ботанического сада БИН РАН. Развитие пыльников изучали с помощью методов цитоэмбриологии и сканирующей электронной микроскопии.
Результаты. Пыльники у обеих линий 4-гнездные. Сформированная стенка микроспорангиев 4-слойная, в зрелом пыльнике – 2-слойная. Микроспорогенез сукцессивного типа, тетрады микроспор изобилатеральные, с различной толщиной каллозных оболочек и отсутствием каллозных гребней к центру гнезда. Однако также отмечены единичные линейные, Т-образные и зигзагообразные тетрады. Пыльцевые зерна 3-клеточные. Процессы микроспоро- и микрогаметофитогенеза в целом протекают нормально, хотя в отдельных пыльниках, особенно линии 9, выявлены аномалии развития: отставание хромосом в анафазе мейотических делений, присутствие стерильной пыльцы, многоядерных микроспор, пыльцы с дополнительными ядрами и др.
Заключение. Развитие пыльника и пыльцевого зерна у обеих линий эгилопсно-пшеничных гибридов сходно с таковым у *Triticum*. Исключение составляют разнообразное строение тетрад микроспор и отсутствие в них каллозных гребней, характерных для пшениц и, возможно, наследуемых от *A. biuncialis*. Выявленные аномалии развития, вероятно, существенно не влияют на качество пыльцы исследуемых линий, что указывает на возможность их использования в селекции.

Ключевые слова: микроспорангий, микроспорогенез, микрогаметофитогенез, аномалии развития

Благодарности: работа выполнена по проекту Федерального исследовательского центра Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР): «Структурирование и раскрытие потенциала наследственной изменчивости мировой коллекции зерновых и крупяных культур ВИР для развития оптимизированного генбанка и рационального использования в селекции и растениеводстве» (FGEM-2022-0009), а также в рамках государственного задания Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН (БИН РАН) по теме № 124013100862-0.
В работе использовано оборудование Центра коллективного пользования «Клеточные и молекулярные технологии изучения растений и грибов» БИН РАН (Санкт-Петербург).

Для цитирования: Торшилова А.А., Ивасенко Ж.В., Титова Г.Е., Чикида Н.Н. Развитие пыльника и пыльцевого зерна у спонтанных естественных эгилопсно-пшеничных гибридов (*Aegilops biuncialis* × *Triticum* sp.). *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(1):228-237. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o17

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

© Торшилова А.А., Ивасенко Ж.В., Титова Г.Е., Чикида Н.Н., 2026

SYSTEMATICS, PHYLOGENY AND GEOGRAPHY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o17

Anther and pollen grain development in spontaneous natural *Aegilops*–wheat hybrids (*Aegilops biuncialis* ×*Triticum* sp.)

Alla A. Torshilova[1], Zhanna V. Ivasenko[1], Galina E Titova[1], Nadejda N. Chikida[2]

[1] *Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*

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

Corresponding author: Alla A. Torshilova, phoenix62@binran.ru

Background. Dagestan Experiment Station of VIR for the first time obtained *Aegilops*–wheat hybrids. *Aegilops biuncialis* Vis. (UM genomic structure) served as the maternal form for one of them. These hybrids required an analysis of their embryological characteristics to understand their nature and assess their reproductive potential. The objective was to identify specific features of the anther development in two *Aegilops–Triticum* hybrid lines versus their paternal parent (*Triticum* L.).
Materials and methods. Two lines (7 and 9, differing in ear morphology) of *Aegilops*–wheat hybrids from the VIR collection were studied. Plants were grown in the Botanical Garden of the Komarov Botanical Institute. Anther development was studied by cytoembryological methods and scanning electron microscopy.
Results. The anthers of both lines were 4-loculated. The formed microsporangia wall was 4-layered; in a mature anther it was 2-layered. Microsporogenesis was of the successive type; the microspore tetrads were isobilateral, with variable callose wall thickness and the absence of callose ridges toward the locule's center. However, linear, T-shaped, and zigzag tetrads also occurred. Pollen grains were 3-celled. Microsporogenesis and microgametophytogenesis proceeded normally, although some anthers (especially in line 9) manifested anomalies of development: lagging chromosomes in the anaphase of meiotic divisions, presence of sterile pollen, multinuclear microspores, pollen grains with additional nuclei and pores, etc.
Conclusion. Anther and pollen grain development in both *Aegilops–Triticum* hybrid lines was similar to that of *Triticum*. The only difference was the more variable structure of their microspore tetrads and the absence of callose ridges typical of wheat: it could be inherited from *A. biuncialis*. The identified developmental anomalies are not likely to affect significantly the pollen quality in the studied hybrids, suggesting that they may be useful for breeders.

Keywords: microsporangium, microsporogenesis, microgametophytogenesis, developmental anomalies

Acknowledgments: this work was carried out under the project of the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR): "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" (FGEM-2022-0009), as well as under the state task assigned to the Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences (BIN RAS), Topic No. 124013100862-0.
The work utilized equipment from the Shared Use Center *Cellular and Molecular Technologies for the Study of Plants and Fungi* of the Komarov Botanical Institute (St. Petersburg).

For citation: Torshilova A.A., Ivasenko Zh.V., Titova G.E., Chikida N.N. Anther and pollen grain development in spontaneous natural *Aegilops*–wheat hybrids (*Aegilops biuncialis* ×*Triticum* sp.). *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(1):228-237. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o17

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Современные сорта продовольственной пшеницы имеют в своей основе ограниченное генетическое разнообразие, так как селекционеры используют высокопродуктивные сорта, чьи хозяйственно полезные признаки к настоящему времени достигли максимального выражения. Кроме того, такой подход к селекционному материалу актуализирует поиск новых путей к решению задач повышения урожайности, его стабильности и устойчивости к абиотическим и биотическим факторам среды.

Многие исследователи обращают внимание на виды рода *Aegilops* L. – ближайшего родича пшеницы. Род *Aegilops* представлен 27 видами, три генома которых вошли в геномы продовольственной пшеницы: *Triticum aestivum* L. (2n = 42, геном ABD-мягкой-хлебной, геном BD), *T. durum* Desf. (2n = 28, геном AB-твердой-крупяной, геном B) и *T. timofeevii* Zhuk. (2n = 28, геном AG-тетраплоидный эндемик Закавказья, геном G). Большинство из них хорошо адаптированы к условиям произрастания и имеют в генотипе эффективные гены устойчивости к грибным инфекциям в сочетании с высокими показателями хлебопекарных качеств (Sorokina, 1934; Boguslavskii, Golik, 2004).

На Дагестанской опытной станции – филиале ВИР получены первые в России и в мире спонтанные плодовитые эгилопсно-пшеничные гибриды (СГ), которые являются уникальным природным материалом для использования в селекционных программах по расширению генофонда продовольственной пшеницы, сочетающей новые аллели генов и генетически детерминированные признаки. Данные гибриды между разногеномными тетраплоидными (2n = 28) видами эгилопсов *Aegilops ovata* L. (UM), *A. biuncialis* Vis. (UM), *A. kotschyi* Boiss. (SU), *A. triuncialis* L. (UC) и одним гексаплоидным видом *A. trivialis* Migush. & Khak. (= *A. crassa* Boiss. ex Hohen. n = 42, DDM) получили и размножили в период с 2008 по 2024 г. При этом установлено, что их гибридные зерновки при репродукции сохраняли в 10–12 поколениях высокую озерненность колоса с полноценными, хорошо выполненными зерновками. До этого спонтанная гибридизация между видами эгилопсов и пшеницей в условиях экспериментального поля Дагестанской опытной станции ВИР подробно изучалась и другими авторами (Berland-Kozhevnikov, Boguslavskii, 1980), однако «…Все выделенные… спонтанные гибриды имели стерильные пыльники. Искусственное вскрытие пыльников и нанесение их содержимого на рыльце своего цветка не привело к завязываемости зерен» (Boguslavskii, 1980, с. 21).

Полученные гибриды нуждаются во всестороннем комплексном изучении – определении их геномного содержания, оценке морфолого-анатомических признаков, количества и структуры хромосом, уровня завязываемости семян и др. Одной из важнейших характеристик также являются особенности протекания эмбриологических процессов – развития мужских и женских репродуктивных структур, половых клеток, эмбрио- и эндоспермогенеза, формирования семени. Такие исследования способствуют пониманию специфики прохождения процессов оплодотворения и способов опыления у исследуемых гибридов. Кроме того, они позволяют оценить репродуктивный потенциал гибридных растений и перспективы их использования в генетико-селекционном процессе. Актуальность исследований также обусловлена почти полным отсутствием данных эмбриологического исследования диких видов *Aegilops* и их гибридов. В литературе достаточно полно представлена эмбриологическая характеристика различных видов и гибридов злаков, особенно пшениц (Batygina, Yakovlev, 1990; Kamelina, 2011) – отцовской формы эгилопсно-пшеничных гибридов. По *Aegilops* же имеются лишь сведения о типе пыльцевого зерна и особенностях спермиогенеза у *A. squarrosa* L. (= *A. tauschii* Coss.) (Tatintseva, 1975), палинологии *A. cylindrica* Host, *A. umbellulata* Zhuk., *A. triuncialis* и др. (Panajiotidis et al., 2000) и степени фертильности пыльцы у видов *Aegilops* (Gavrilova, 1985) и ряда пшенично-эгилопсных гибридов (Sichnyak, 2008; Kozhachmetov, 2009).

Исходя из этого, *цель работы* состояла в выявлении особенностей развития пыльника и пыльцевого зерна у некоторых линий спонтанных естественных эгилопсно-пшеничных гибридов (*Aegilops biuncialis* × *Triticum* sp.) и их сравнении с таковыми у *Triticum* L.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования использовали две линии эгилопсно-пшеничных гибридов (СГ) *Aegilops biuncialis* × *Triticum* sp. из коллекции ВИР – линию 7 (к-4864) и линию 9 (к-4868), материнской формой которых являются образцы коллекции вида *A. biuncialis*: линия 7, ♀ к-4133, и линия 9, ♀ к-4123, *A. biuncialis* из Ливана, отличающиеся по морфологии колоса.

Семена гибридов помещали в горшки с почвой в мае 2023–2024 гг. После появления всходов их высаживали в открытый грунт на территории Ботанического сада им. Петра Великого (БИН РАН). Фиксацию цветков с развивающимися пыльниками (по 5–6 шт. из средней части колоса, с нескольких растений) осуществляли ежедневно в смеси FAA (70-процентный этиловый спирт, ледяная уксусная кислота, формалин в соотношении 100 : 7 : 7). Постоянные препараты изготавливали по цитоэмбриологической методике (Pausheva, 1980). Срезы толщиной 12 мкм получали на микротоме Microm 325 (Carl Zeiss, Германия) и окрашивали сафранином и алциановым синим. Анализ препаратов осуществляли с помощью светового микроскопа Axio Imager.Z1 с ПО AxioVision (Carl Zeiss, Germany) Центра коллективного пользования оборудованием БИН РАН. Прижизненные наблюдения проводили с использованием стереоскопического микроскопа Stemi 2000-C и фотокамеры AxioCam MRc-5 (Carl Zeiss, Germany). Для анализа строения зрелой пыльцы на сканирующем электронном микроскопе (JSM-6390LA, Jeol Ltd., Japan) образцы наклеивали на столики и напыляли смесью палладия с золотом по стандартной методике.

Результаты исследования

Андроцей у обеих исследуемых линий эгилопсно-пшеничных гибридов представлен тремя тычинками, плотно прилегающими к опушенной завязи и сидячему перистому столбику в нераскрывшихся цветках и отходящими от них при их раскрытии. Каждая тычинка состоит из длинного пыльника и короткой тычиночной нити, однако зрелые пыльники у линии 7 несколько короче, чем у линии 9 – около 3 и 4 мм длиной соответственно (рис. 1, *1–3*). Пыльники 4-гнездные, с гнездами, попарно объединенными в теки; в связнике присутствует крупный проводящий пучок, следующий из тычиночной нити. Перегородки между гнездами в теках короткие – как на ранних стадиях развития, так и в созревающих пыльниках – и не разрушаются в ходе развития.

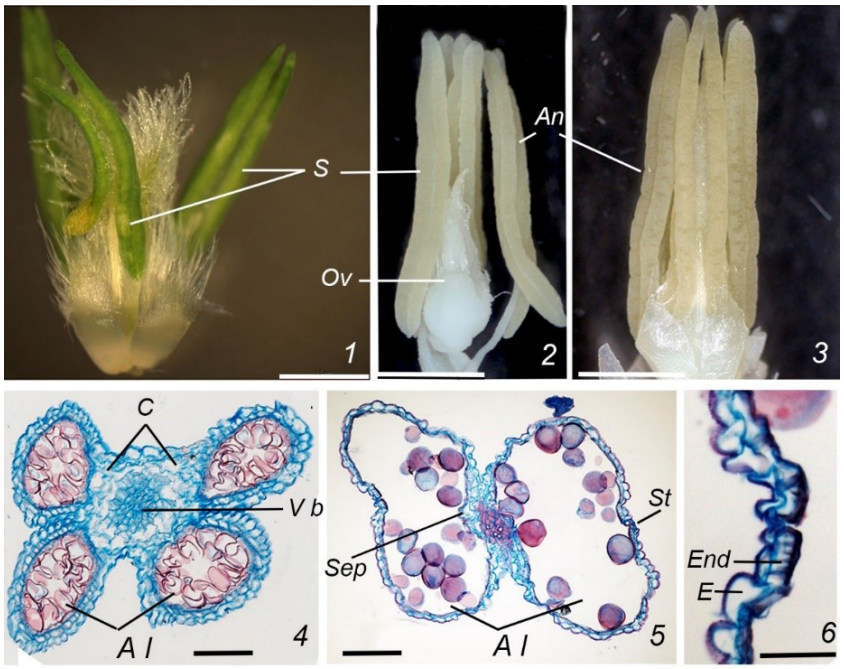


Рис. 1. Строение пыльника у эгилопсно-пшеничных гибридов: *1–3* – внешний вид пыльников в раскрывающемся цветке (***1***) и в рыхлом бутоне (***2***, ***3***); ***4***, ***5*** – строение пыльников на поперечном срезе на стадии вакуолизированных микроспор (***4***) и зрелых пыльцевых зерен (***5***); ***6*** – клетки стомиума; ***1***, ***2***, ***4–6*** – линия 7; ***3*** – линия 9.
An – пыльник; ***A l*** – гнездо пыльника; ***C*** – связник; ***Ov*** – завязь; ***Sep*** – перегородка в теке; ***S*** – тычинка; ***St*** – стомиум.
Масштабная линейка: ***1–3*** – 1 мм; ***4***, ***5*** – 100 мкм; ***6*** – 20 мкм

Fig. 1. Anther structure in *Aegilops*–wheat hybrids: *1–3* – external view of the anthers in a developing flower (***1***) and in a loose bud (***2***, ***3***); ***4***, ***5*** – anther structure on the cross-sections at the stage of vacuolized microspores (***4***) and mature pollen grains (***5***); ***6*** – stomium cells; ***1***, ***2***, ***4–6*** – line 7; ***3*** – line 9.
An – anther; ***A l*** – anther locule; ***C*** – connective; ***Ov*** – ovary; ***Sep*** – septa, partition between the locules; ***S*** – stamen; ***St*** – stomium.
Scale bars: ***1–3*** – 1 mm; ***4***, ***5*** – 100 μm; ***6*** – 20 μm

В стенке пыльника, в области окончания перегородок, формируется стомиум, способствующий вскрыванию гнезд и состоящий в зрелом пыльнике из мелких клеток эпидермиса и подстилающих крупных клеток фиброзного слоя (см. рис. 1, *4–6*).

Сформированная стенка гнезда пыльника 4-слойная, состоит из еще не специализированных клеток эпидермиса, эндотеция, среднего слоя и тапетума; тапетум выстилает все гнездо пыльника, но имеет двойственное происхождение: с внешней стороны он является производным клеток стенки гнезда пыльника, с внутренней – производным клеток связника. На стадии преобразования спорогенных клеток в микроспороциты клетки эпидермиса, эндотеция и среднего слоя слегка уплощаются, а клетки тапетума увеличиваются в размерах и приобретают плотную цитоплазму (рис. 2, *1*, *2*). В ходе мейоза в микроспороцитах клетки тапетума становятся нерегулярно двуядерными, тогда как клетки остальных слоев – сильно вакуолизированными и еще более уплощенными (см. рис. 2, *3*, *4*).

В постмейотический период клетки эпидермиса и эндотеция сохраняются (с формированием на клеточных стенках эндотеция фиброзных утолщений), а клетки среднего слоя и тапетума постепенно подвергаются деструкции. Следует, однако, отметить, что на ранних и средних этапах постмейотического периода (в ходе формирования микроспор и пыльцевого зерна) для клеток тапетума характерна высокая активность, с образованием в них крупных вакуолей и тапетальной пленки с орбикулами на поверхности (см. рис. 2, *5*, *6*). Стенка зрелого пыльника 2-слойная, состоит из вакуолизированных клеток эпидермиса (с выраженной поверхностной скульптурой наружных оболочек) и клеток фиброзного эндотеция; местами сохраняются остатки клеток тапетума с орбикулами (см. рис. 2, *7*, *8*).

Микроспорогенез у обеих линий симультанного типа. На стадии преобразования спорогенных клеток в микроспороциты последние постепенно увеличиваются в размерах, с отложением на клеточных стенках слоя каллозы. Ядра клеток микроспороцитов также увеличиваются и содержат одно или несколько крупных ядрышек (рис. 3, *1a*, *1b*). Характерной особенностью спорогенных клеток и микроспороцитов является их однослойное расположение, с прилеганием каждой клетки к тапетуму и со стороны стенки гнезда пыльника, и со стороны связника (см. рис. 2, *1*, *2*). Каждое мейотическое деление в микроспороцитах (М1, М2) сопровождается цитокинезом с последовательным образованием диад и тетрад микроспор – обычно изобилатерального типа. Деления клеток, как правило, происходят параллельно поверхности тапетума, вследствие чего тетрады, окруженные каллозными оболочками, также имеют однослойное расположение (см. рис. 2, *3*, *4*; рис. 3, *2a–4b*).

По завершении мейоза, вследствие лизиса каллозных оболочек, тетрады распадаются на отдельные микроспоры, но с сохранением их однослойного расположения. На ранних этапах развития микроспоры содержат ядро (в центральном положении) и плотную цитоплазму с мелкими вакуолями (стадия слабо вакуолизированной микроспоры) (см. рис. 3, *5a*, 5*b*). По мере роста микроспор

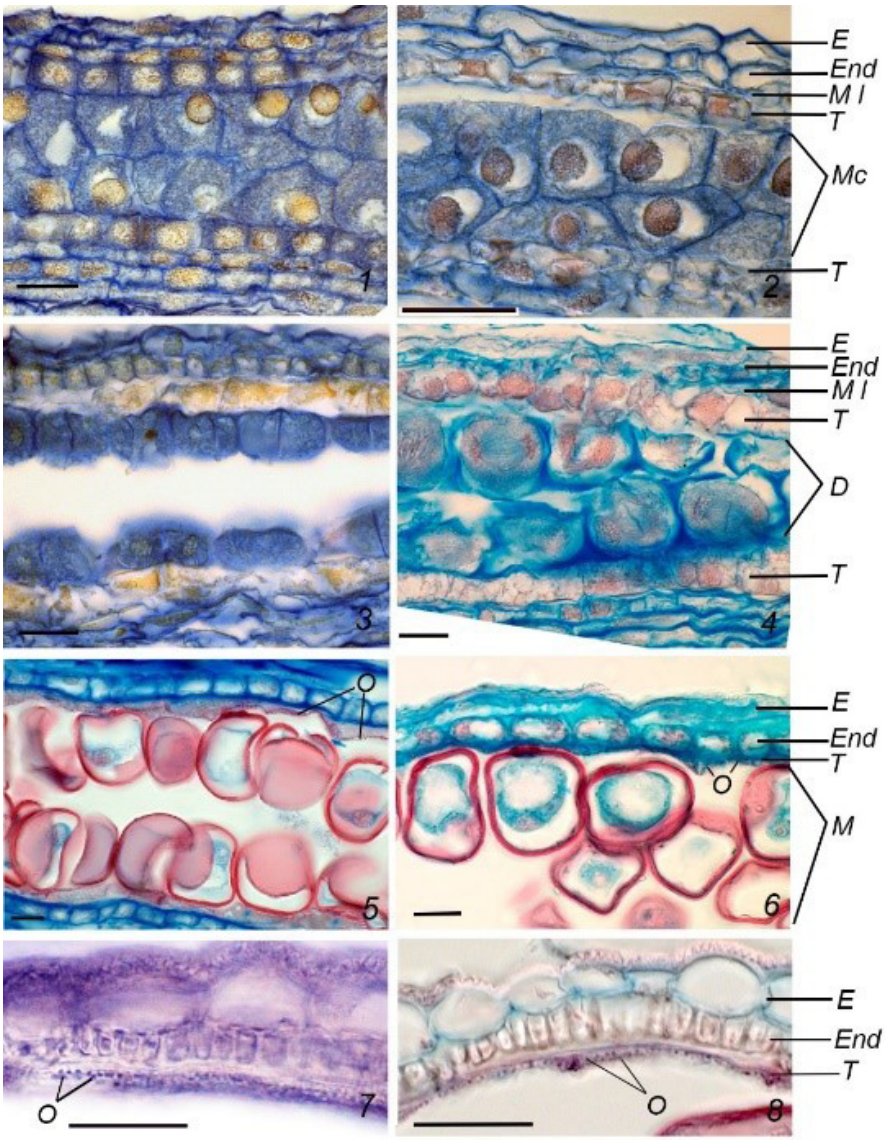


Рис. 2. Развитие стенки пыльника у эгилопсно-пшеничных гибридов (*1*, *3*, *5*, *7* – линия 7; *2*, *4*, *6*, *8* – линия 9):
1–8 – строение стенки пыльника на стадиях преобразования спорогенных клеток в микроспороциты (***2***), диад микроспор (***3***, ***4***), сильно вакуолизированных микроспор (***5***, ***6***) и зрелых пыльцевых зерен (***7***, ***8***).
E – эпидермис; *End* – эндотеций, *D* – диады микроспор, *M* – микроспоры, *Mc* – микроспороциты, *M l* – средний слой; *O* – орбикулы; *T* – тапетум.
Масштабная линейка: ***1***, ***3–6*** – 20 мкм; *2* – 40 мкм; ***7***, ***8*** – 50 мкм

Fig. 2. Development of the anther wall in *Aegilops*–wheat hybrids (*1*, *3*, *5*, *7* – line 7; *2*, *4*, *6*, *8* – line 9):
1–8 – anther wall structure at the stages of transformation of the sporogenous cells in microsporocytes (***1***, ***2***), dyads of microspores (***3***, ***4***), highly vacuolized microspores (***5***, ***6***), and mature pollen grains (***7***, ***8***).
E – epidermis; *End* – endothecium; *D* – dyads of microspores; *M* – microspores; *Mc* – microsporocytes; *M l* – middle layer; *O* – orbicules; *T* – tapetum.
Scale bars: ***1***, ***3–6*** – 20 μm; *2* – 40 μm; ***7***, ***8*** – 50 μm

размеры их ядер (с крупным ядрышком) и вакуолей постепенно увеличиваются, что сопровождается усложнением структуры оболочек микроспор, с формированием экзины и интины, а также поры прорастания в зоне контакта с тапетумом (см. рис. 3, *6a*, *6b*). На завершающем этапе развития многочисленные вакуоли в цитоплазме микроспоры сливаются в крупную центральную вакуоль, а ядро смещается в пристенное положение, располагаясь супротивно поре (стадия сильно вакуолизированной микроспоры). В результате микроспоры приобретают полярное строение (см. рис. 3, *7a*, *7b*), но с сохранением их однослойного расположения вдоль тапетума (см. рис. 1, *4*; рис. 2, *5*, *6*).

Пыльцевые зерна 3-клеточные, состоят из вегетативной клетки и двух клеток-спермиев. Отделение генеративной клетки происходит в сильно вакуолизированной микроспоре посредством неравного (дифференцирующего) деления. Образующаяся генеративная клетка линзовидная, меньше по размерам, чем вегетативная клетка, и с малым количеством цитоплазмы, но, как и ядро вегетативной клетки, сначала располагается пристенно (см. рис. 3, *8a*, *8b*). Далее генеративная клетка отделяется от стенки пыльцевого зерна и перемещается внутрь вегетативной клетки, постепенно занимая центральное положение, куда перемещается и ядро вегетативной клетки. Деление генеративной клетки с образованием спермиев

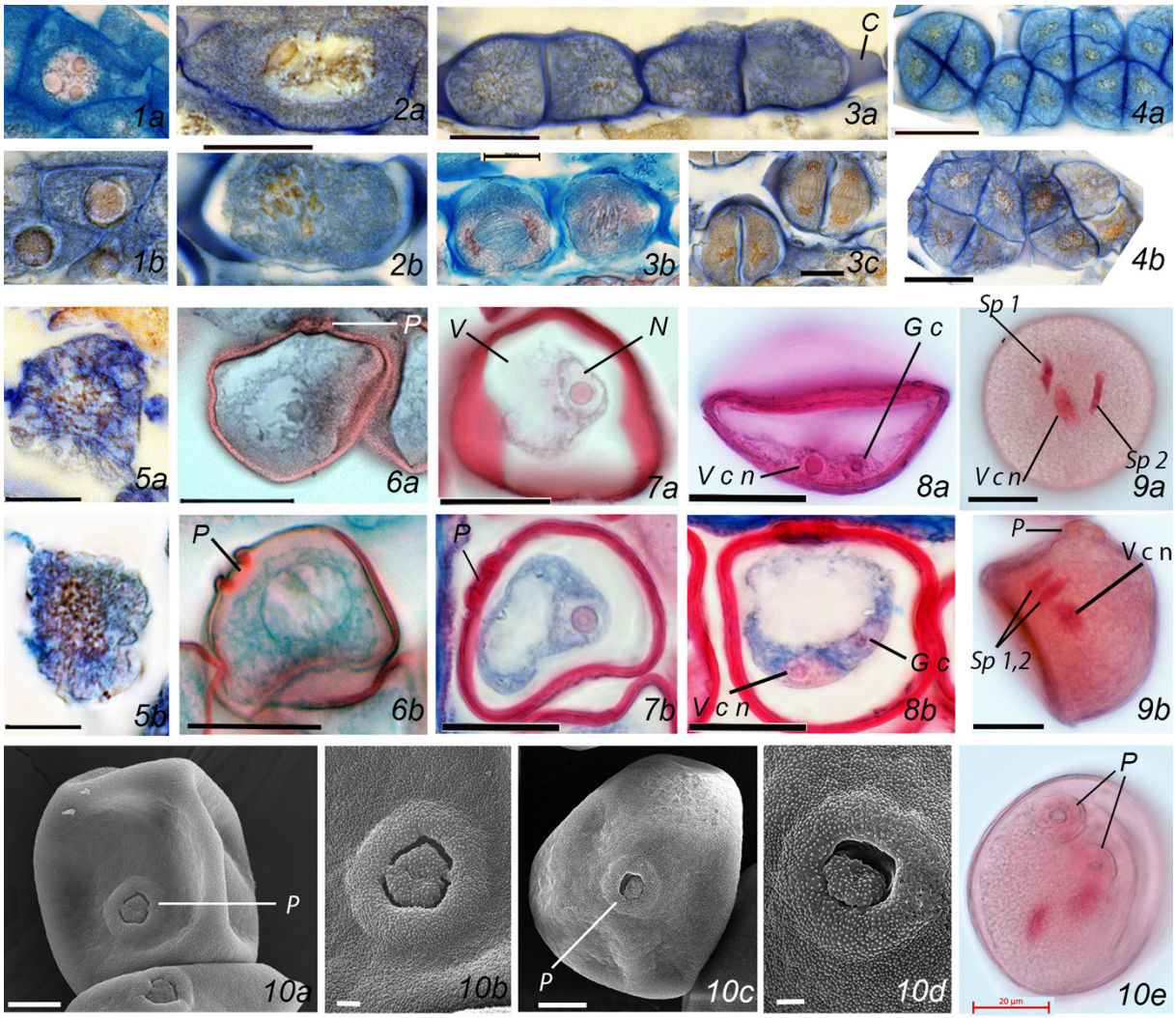


Рис. 3. Микроспорогенез (*1a–4b*) и развитие пыльцевого зерна (*5a–10e*) у эгилопсно-пшеничных гибридов (*1a–9a*, *10a*, *10b* – линия 7; *1b–9b*, *10c–10e* – линия 9):

1a, ***1b*** – спорогенные клетки, преобразующиеся в микроспороциты; ***2a***, ***2b*** – микроспороциты в профазе М1; ***3a–3c*** – диады и ***4a***, ***4b*** – тетрады микроспор; ***5a–6b*** – слабо вакуолизированная; ***7a***, ***7b*** – сильно вакуолизированная микроспора; ***8a***, ***8b*** – 2-клеточное и ***9a***, ***9b*** – 3-клеточное пыльцевое зерно; ***10a–10d*** – внешний вид пыльцевого зерна (***10a***, ***10c***) и его строение в области поры, СЭМ (***10b***, ***10d***); ***10e*** – пыльцевое зерно с двумя порами.

C – каллоза; *G c* – генеративная клетка; *N* – ядро микроспоры; *P* – пора; *Sp1*, *Sp2* – спермии; *V* – вакуоль; *V c n* – ядро вегетативной клетки.

Масштабная линейка: ***1a –9b***, ***10e*** – 20 мкм; ***10a***, ***10c*** – 10 мкм; ***10b***, ***10d*** – 2 мкм

Fig. 3. Microsporogenesis (*1a–4b*) and pollen grain development (*5a–10e*) in *Aegilops*–wheat hybrids (*1a–9a*, *10a*, *10b* – line 7; *1b–9b*, *10c–10e* – line 9):

1a, ***1b*** – sporogenous cells transforming into microsporocytes; ***2a***, ***2b*** – microsporocytes at the M1 prophase; ***3a–3c*** – dyads and ***4a***, ***4b*** – tetrads of microspores; ***5a–6b*** – weakly vacuolized and ***7a***, ***7b*** – highly vacuolized microspore; ***8a***, ***8b*** – 2-celled and ***9a***, ***9b*** – 3-celled pollen grain; ***10a–10d*** – external view of a pollen grain (***10a***, ***10c***) and its structure in the pore area, SEM (***10b***, ***10d***); ***10e*** – a pollen grain with two pores.

C – callose; G c – generative cell; N – nucleus of a microspore; P – pore, *Sp1*, *Sp2* – sperms; V – vacuole; V c n – the nucleus of the vegetative cell.

Scale bars: ***1a–9b***, ***10e*** – 20 µm; ***10a***, ***c*** – 10 µm; ***10b***, ***10d*** – 2 µm

происходит вблизи ядра вегетативной клетки. Спермии серповидные, короткие, но несколько удлиняются при созревании пыльцевого зерна, хотя в целом их длина не превышает диаметр ядра вегетативной клетки. Формирование генеративной клетки и спермиев сопровождается постепенным сокращением объема центральной вакуоли вегетативной клетки и накоплением в ее цитоплазме запасных веществ (см. рис. 3, *9a*, *9b*). Зрелые пыльцевые зерна у обеих линий округлые или слегка экваториально-уплощенные, с выраженной поверхностной скульптурой экзины и апертурой в виде поры с крышечкой (см. рис. 3, *10a–10d*).

Наряду с типичным развитием стенки пыльника и пыльцевого зерна у обеих линий выявлены определенные нарушения. К их числу относятся случаи: дегенерации клеток тапетума и микроспороцитов в ходе микроспорогенеза (рис. 4, *1*); наличия фрагментов хромосом вне метафазной пластинки в М1 и М2 с образованием микроядер (см. рис. 4, *2*, *3*); формирования многоядерных микроспор (от 2 до 5 ядер) и пыльцевых зерен с дополни-

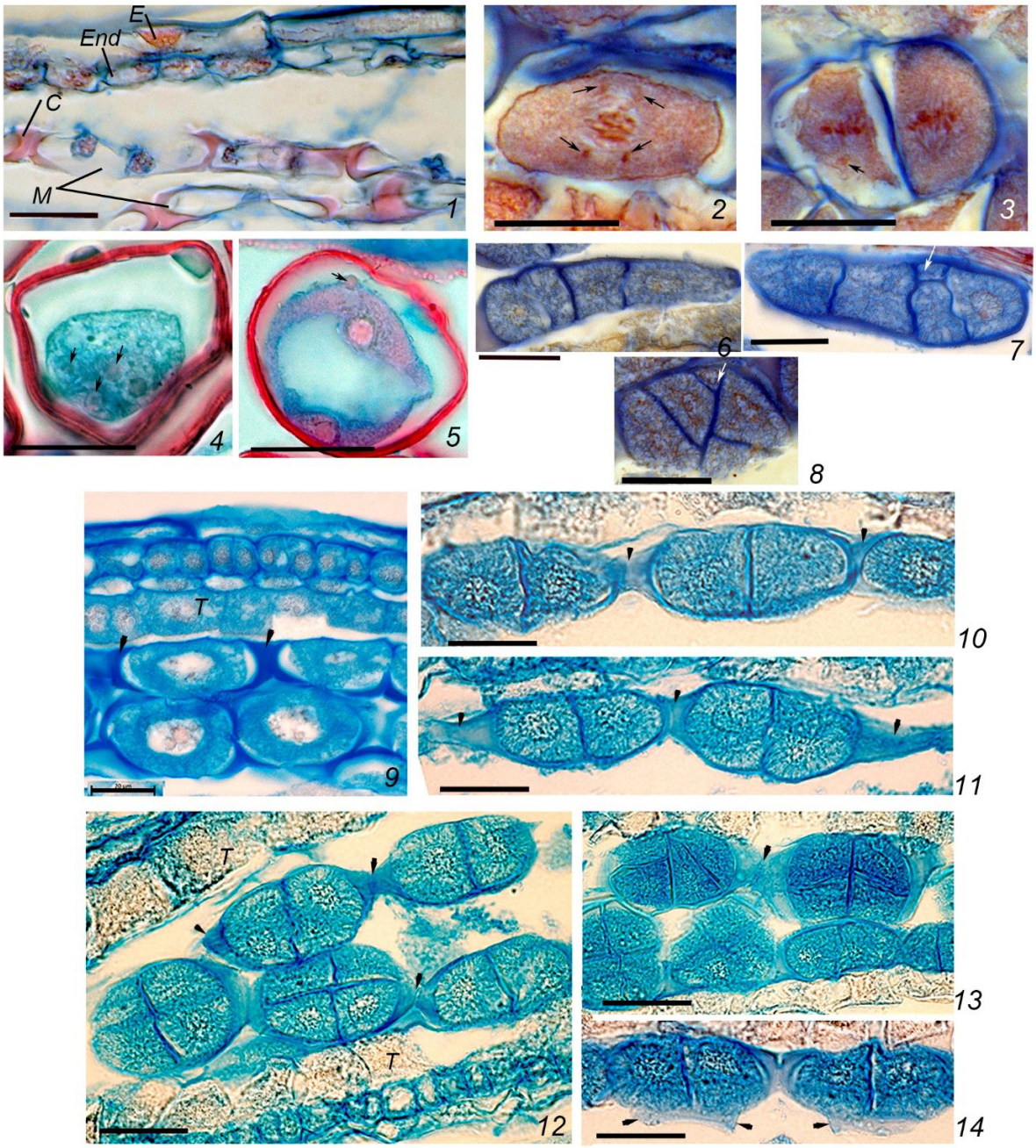


Рис. 4. Нарушения и отклонения в развитии пыльника и пыльцевого зерна у эгилопсно-пшеничных гибридов (*1*, *6*, *7*, *9–14* – линия 7; *2–5*, *8* – линия 9): ***1*** – гнездо пыльника с отсутствием тапетума и дегенерацией делящихся микроспороцитов; ***2***, ***3*** – метафаза М1 и М2 с фрагментами хромосом вне метафазной пластинки; ***4*** – многоядерная микроспора; ***5*** – 2-клеточное пыльцевое зерно с дополнительным ядром; ***6*** – линейная, ***7*** – Т-образная, ***8*** – зигзагообразная тетрады микроспор (***7***, ***8*** – тетрады с дополнительной клеткой); ***9–14*** – каллозные оболочки в микроспороцитах (***9***) и тетрадах микроспор (***10–14***) (***12*** и ***13*** – различная ориентация изобилатеральных и Т-образных тетрад относительно тапетума); *C* – каллоза; *M* – микроспороциты; длинными стрелками указаны фрагменты хромосом вне метафазной пластинки (***2***, ***3***), дополнительные ядра (***4***, ***5***) и клетки (***7***, ***8***), короткими – выросты каллозных оболочек (***9–14***).
Масштабная линейка: ***1–14*** – 20 мкм

Fig. 4. Anomalies and deviations in the anther and pollen grain development in *Aegilops*–wheat hybrids (*1*, *6*, *7*, *9–14* – line 7; *2–5*, *8* – line 9): ***1*** – the anther locule with the absence of the tapetum and the degeneration of dividing microsporocytes; ***2***, ***3*** – the M1 and M2 metaphases with fragments of chromosomes outside the metaphase plate; ***4*** – multinucleate microspore; ***5*** – 2-celled pollen grain with the additional nucleus; ***6*** – linear, ***7*** – T-shaped and ***8*** – zigzag-shaped tetrads of microspores (***7***, ***8*** – tetrads with the additional cells); ***9–14*** – callose walls in microsporocytes (***9***) and tetrads of microspores (***10–14***) (***12*** и ***13*** – different orientation of isobilateral and T-shaped tetrads relative to the tapetum); *C* – callose; *M* – microsporocytes; long arrows indicate fragments of chromosomes outside the metaphase plate (***2***, ***3***), additional nuclei (***4***, ***5***), and cells (***7***, ***8***); short arrows indicate outgrowths of callous membranes (***9–14***).
Scale bar: ***1–14*** – 20 μm

тельными ядрами (см. рис. 4, *4*, *5*), а также с дополнительными (одной или двумя) порами (см рис. 3, *10e*). Причины возникновения многоядерных микроспор и пыльцы с дополнительными ядрами неясны, но, возможно, связаны с образованием микроядер в ходе мейоза. В отдельных пыльниках присутствовала стерильная пыльца (с задержкой развития на стадии сильно вакуолизированной микроспоры), по визуальной оценке, чаще встречающаяся у линии 9.

В качестве отклонений можно отметить формирование не только изобилатеральных, но и линейных, Т-образных или зигзагообразных тетрад микроспор, в отдельных из которых также наблюдались дополнительные клетки (см. рис. 4, *6–8*). Еще одна особенность состояла в варьировании толщины каллозных оболочек микроспороцитов и особенно тетрад микроспор. В каждой тетраде микроспор они наиболее развиты в зоне контакта с соседними тетрадами, но в разной степени, нередко с образованием длинных выростов, причем как в случаях изобилатеральных тетрад микроспор, так и их других типов (см. рис. 4, *9–13*). В редких случаях наблюдались мелкие каллозные «гребни», ориентированные к центру гнезда пыльника (см. рис. 4, *14*). Также отмечалось инвертированное положение тетрад, с их расположением перпендикулярно к тапетуму (см. рис. 4, *12*, *13*), но чаще по углам гнезда пыльников (см. рис. 4, *12*).

Обсуждение

Проведенное исследование показало, что развитие пыльника и пыльцевого зерна у изученных линий эгилопсно-пшеничных гибридов (*Aegilops biuncialis* × *Triticum* sp., линии 7 и 9) сходно и вместе с тем проявляет значительное сходство с таковым у *Triticum*.

Как и изученные виды и гибриды *Triticum* (*T. aestivum*, сорт 'Диамант', линия Фотос, *T. monococcum* L., *T. dicoccum* Schrank и др.), обе линии эгилопсно-пшеничных гибридов характеризуются наличием 4-гнездных пыльников, 4-слойной сформированной и 2-слойной стенки зрелого пыльника, сукцессивного типа микроспорогенеза с образованием изобилатеральных тетрад микроспор, 3-клеточной пыльцы. Причем особенности развития стенки пыльника, процессов микроспорогенеза и формирования пыльцевого зерна почти идентичны таковым у *Triticum*. Так, для эгилопсно-пшеничных гибридов характерна та же ориентация веретен мейотических делений в микроспороцитах, обуславливающая однослойное расположение микроспор и пыльцевых зерен вдоль стенки гнезда пыльников (с контактом поры с тапетумом), а также те же закономерности процесса микрогаметофитогенеза: отделение генеративной клетки в сильно вакуолизированной микроспоре, с закономерным характером ее движения внутри вегетативной клетки и последующим образованием серповидных спермиев (Schnarf, 1937; Romanov 1970; Batygina, 1974, 1987; Barygina et al., 2010; etc.). Некоторое исключение составляет формирование у эгилопсно-пшеничных гибридов не только изобилатеральных, но и линейных, Т-образных и зигзагообразных тетрад микроспор, обычно не отмечаемых у *Triticum* (Romanov, 1970; Batygina, 1974; Batygina et al., 2010), но встречающихся у других таксонов сем. Poaceae (Kamelina, 2011). Также в тетрадах обычно отсутствовали каллозные гребни в виде выростов в центр гнезда пыльника, характерных для пшениц (Romanov, 1970). Не исключено, что зрелые спермии у исследуемых линий имеют более мелкие размеры, с длиной, обычно не превышающей диаметр ядра вегетативной клетки, что подтверждается и изображением спермиев у *Aegilops tauschii* (Tatinsteva, 1975). У пшениц же, особенно у гексаплоидной *Triticum aestivum*, спермии, по данным Т. Б. Батыгиной (Batygina, 1974), более крупные и, судя по иллюстрациям автора (см. рис. 4, *27*), длиннее диаметра ядра вегетативной клетки, что, однако, нуждается в специальном исследовании.

Выявленные нарушения в развитии пыльников у исследуемых эгилопсно-пшеничных гибридов (стерилизация микроспороцитов вследствие нарушения формирования тапетума, присутствие в пыльниках стерильной пыльцы, многоядерных микроспор и пыльцевых зерен с дополнительными ядрами и апертурами) обычно присущи гибридным растениям. Например, они отмечены у межвидовых гибридов пшеницы (Simonyan, 1964; Ukhinova et al., 2009; etc.), пшенично-ржаных, пшенично-пырейных гибридов (Glavatskaya, 1967; Zueva, 1969), а также у ряда гибридов от скрещиваний твердой пшеницы *Triticum turgidum* L. с *Aegilops triuncialis* (Sichnyak, 2008) и гексаплоидной пшеницы с тетраплоидными видами *Aegilops* – *A. cylindrica*, *A. triastata* Willd, *A. triuncialis* (Kozhakhmetov, 2009), причем в значительном количестве и приводящие к снижению уровня фертильности пыльцы. Так, у пшенично-эгилопсных гибридов, полученных от скрещиваний гексаплоидной пшеницы с тетраплоидными видами *Aegilops*, процент стерильной пыльцы в F_1 был очень высоким (82–98%) вследствие отсутствия спаривания и расхождения хромосом в мейозе (Kozhakhmetov, 2009). Наблюдаемые же аномалии развития у исследуемых эгилопсно-пшеничных гибридов встречались лишь в отдельных пыльниках, а их пыльцевые зерна являлись преимущественно выполненными, хотя и в несколько меньшей степени у линии 9. Это позволяет полагать, что качество их пыльцы более сопоставимо с таковым у диких видов злаков, например у *Bromus riparius* (Rehmann) Holub, *Calamagrostis epigejos* (L.) Roth и др. из Саратовской обл., с уровнем ее стерильности не выше 10–15% (Kaibeleva, 2022).

Заключение

Развитие пыльника и пыльцевого зерна у двух исследованных линий спонтанных естественных эгилопсно-пшеничных гибридов (*Aegilops biuncialis* × *Triticum* sp.) осуществляется сходно с таковым у *Triticum*. Исключение составляют образование у эгилопсно-пшеничных гибридов не только изобилатеральных, но и линейных, Т-образных и зигзагообразных тетрад микроспор, отсутствие в них каллозных гребней, ориентированных к центру гнезда пыльника и, возможно, меньшие размеры спермиев. Эти специфичные признаки, вероятно, унаследованы ими от *A. biuncialis* (материнской формы исследуемых гибридов), в связи с чем актуален анализ развития пыльника и пыльцевого зерна у этого и других видов *Aegilops* – эмбриологически не изученных таксонов. Выявленные аномалии развития у исследуемых гибридов существенно не влияют на качество их пыльцы, возможно, сопоставимое со многими дикими видами злаков, что, однако, нуждается в проверке с количественной оценкой уровня ее фертильности. В целом же полученные данные указывают на достаточно высокий репродуктивный потенциал пыльников исследуемых линий эгилопсно-пшеничных гибридов и возможность их использования в генетико-селекционном процессе.

References / Литература

Batygina T.B. Cereal grain: atlas (Khlebnoye zerno: atlas). Leningrad: Nauka; 1987. [in Russian] (Батыгина Т.Б. Хлебное зерно: атлас. Ленинград: Наука; 1987).

Batygina T.B. Wheat embryology (Embriologiya pshenitsy). Leningrad: Kolos; 1974. [in Russian] (Батыгина Т.Б. Эмбриология пшеницы. Ленинград: Колос; 1974).

Batygina T.B., Kruglova N.N., Gorbunova V.Yu., Titova G.E., Seldimirova O.A. From microspore to cultivar (Ot mikrospory k sortu). Moscow: Nauka; 2010. [in Russian] (Батыгина Т.Б., Круглова Н.Н., Горбунова В.Ю., Титова Г.Е., Сельдимирова О.А. От микроспоры к сорту. Москва: Наука; 2010).

Batygina T.B., Yakovlev M.S. The Poaceae family (Semeystvo Poaceae). In: T.B. Batygina, M.S. Yakovlev (eds). *Comparative Embryology of Flowering Plants. Monocotyledons (Butomaceae – Lemnaceae) (Sravnitelnaya embriologiya tsvetkovykh. Odnodolnye [Butomaceae – Lemnaceae]).* Leningrad: Nauka; 1990. p.217-234. [in Russian] (Батыгина Т.Б., Яковлев М.С. Семейство Poaceae. В кн.: *Сравнительная эмбриология цветковых. Однодольные (Butomaceae – Lemnaceae)* / под ред. Т.Б. Батыгиной, М.С. Яковлева. Ленинград: Наука; 1990. С.217-234).

Berland-Kozhevnikov V.M., Boguslavskii R.L. Spontaneous hybridization in species of the genus *Aegilops* L. (Spontannaya gibridizatsiya u vidov roda *Aegilops* L.). *VIR Bulletin*. 1978;(84):65-68. [in Russian] (Берлянд-Кожевников В.М., Богуславский Р.Л. Спонтанная гибридизация у видов рода *Aegilops* L. *Бюллетень ВИР*. 1978;(84):65-68).

Boguslavskii R.L. Flowering, pollination and spontaneous hybridization in the genus *Aegilops* L. (Tsveteniye, opyleniye i spontannaya gibridizatsiya v rode *Aegilops* L.) [dissertation]. Leningrad: VIR; 1980. [in Russian] (Богуславский Р.Л. Цветение, опыление и спонтанная гибридизация в роде *Aegilops* L.: дис. ... канд. биол. наук. Ленинград: ВИР; 1980).

Boguslavskii R.L., Golik O V. *Aegilops*–wheat amphidiploids (Egilopsno-pshenichnye amfidiploidy). In: R.L. Boguslavskii, O.V. Golik (eds). The genus *Aegilops* L. as a genetic resource for breeding (Rod *Aegilops* L. kak geneticheskiy resurs selektsii). Kharkov; V.Ya. Yuryev Institute of Plant Production; 2004. p.172-182. [in Russian] (Богуславский Р.Л., Голик О.В. Эгилопсно-пшеничные амфидиплоиды. В кн.: Род *Aegilops* L. как генетический ресурс селекции / под ред. Р.Л. Богуславского, О.В. Голик. Харьков: Институт растениеводства им. В.Я. Юрьева; 2004. С.172-182).

Gavrilova V.A. Morphobiological aspects of the reproduction system in wild wheat species and *Aegilops* (Morfobiologicheskiye aspekty sistemy razmnozheniya vidov dikorastushchey pshenitsy i egilopsa) [dissertation]. Leningrad: VIR; 1985. [in Russian] (Гаврилова В.А. Морфобиологические аспекты системы размножения видов дикорастущей пшеницы и эгилопса: дис. … канд. биол. наук. Ленинград: ВИР; 1985).

Glavatskaya T.P. Comparative cytoembryological study of microsporogenesis and development of the male gametophyte of wheat, wheatgrass, and wheat–wheatgrass hybrids (Sravnitelnoye tsitoembriologicheskoye issledovaniye mikrosporogeneza i razvitiya muzhskogo gametofita pshenitsy, pyreya i pshenichno-pyreynykh gibridov) [dissertation]. Sverdlovsk; 1967. [in Russian] (Главацкая Т.П. Сравнительное цитоэмбриологическое исследование микроспорогенеза и развития мужского гаметофита пшеницы, пырея и пшенично-пырейных гибридов): дис. … канд. биол. наук. Свердловск; 1967).

Kaibeleva E.I. Wild cereals of the Lower Volga region: methods of seed reproduction and phytocenotic role (Dikorastushchiye zlaki Nizhnego Povolzhya: sposoby semennoy reproduktsii i fitotsenoticheskaya rol) [dissertation]. St. Petersburg: Komarov Botanical Institute of the RAS; 2002. [in Russian] (Кайбелева Э.И. Дикорастущие злаки Нижнего Поволжья: способы семенной репродукции и фитоценотическая роль: дис. … канд. биол. наук. Санкт-Петербург: БИН РАН; 2022).

Kamelina O.P. Systematic embryology of flowering plants. Monocotyledons (Sistematicheskaya embriologiya tsvetkovykh rasteniy. Odnodolnye). Barnaul; 2011. [in Russian] (Камелина О.П. Систематическая эмбриология цветковых растений. Однодольные. Барнаул; 2011).

Kozhakhmetov K.K. Some cytological features of *Triticum* × *Aegilops* interspecific hybrids (Nekotorye tsitologicheskiye osobennosti mezhvidovykh gibridov *Triticum Aegilops*). *Soil Science and Agrochemistry*. 2009;(4):45-48. [in Russian] (Кожахметов К.К. Некоторые цитологические особенности межвидовых гибридов *Triticum Aegilops*. *Почвоведение и агрохимия*. 2009;(4):45-48).

Panajiotidis S., Athanasiadis N., Symeonidis L., Karataglis S. Pollen morphology in relation to the taxonomy and phylogeny of some native Greek *Aegilops* species. *Grana*. 2000;39(2-3):126-132. DOI: 10.1080/001731300300045265

Pausheva Z.P. Workshop on plant cytology (Praktikum po tsitologii rasteniy). Moscow: Kolos; 1980. [in Russian] (Паушева З.П. Практикум по цитологии растений. Москва: Колос; 1980).

Romanov I.D. Features of the development of cereal pollen and their significance for some genetic studies. *Russian Journal of Genetics*. 1970;6(10):11-25. [in Russian] (Романов И.Д. Особенности развития пыльцы злаков и их значение для некоторых генетических исследований. *Генетика*. 1970;6(10):11-25).

Schnarf K. Studien über den Bau der Pollenkörner der Angiospermen. *Planta*. 1937;27(4):450-465. [in German]

Sichnyak O.L. Peculiarities of microsporogenesis during hybridization of wheat and *Aegilops triuncialis* L. *Odesa National University Herald*. 2008;13(14):88-94. [in Ukrainian] (Січняк О.Л. Особливості микроспорогенезу за гібридизації пшениці і *Aegilops triuncialis* L. *Вісник Одеського національного університету*. 2008;13(14):88-94).

Simonyan E.G. On cytological studies of wheat *Tr. timopheevii*. *Proceedings of the Academy of Sciences of the Armenian SSR*. 1964;17(3):45-48. [in Russian] (Симонян Е.Г. О цитологических исследованиях пшеницы *Tr. timopheevii*. *Известия Академии наук Армянской ССР*. 1964;17(3):45-48).

Sorokina O.N. Hybridization of *Aegilops* with wheat. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 1934;2(6):7-37. [in Russian] (Сорокина О.Н. Гибридизация эгилопсов с пшеницей. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1934;2(6):7-37).

Tatintseva S.S. Formation and development of sperm in some angiosperms. I. Poaceae (Gramineae); II. Asteraceae (Compositae). *Botanicheskii zhurnal = Botanical Journal*. 1975;60(12):1707-1720. [in Russian] (Татинцева С.С. Образование и развитие спермиев у некоторых покрытосеменных. I. Poaceae (Gramineae); II. Asteraceae (Compositae). *Ботанический журнал*. 1975;60(12):1707-1720).

Ukhinova E.P., Pylnev V.V., Rubets V.S. Cytogenetic analysis of soft wheat hybrids (*Triticum aestivum* L.) with Timofeev wheat (*Triticum timopheevii* Zhuk.) (Tsitogeneticheskiy

analiz gibridov myagkoy pshenitsy [*Triticum aestivum* L.] s pshenitsey Timofeyeva [*Triticum timopheevii* Zhuk.]). *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2009;(2):131-138. [in Russian] (Ухинова Е.П., Пыльнев В.В., Рубец В.С. Цитогенетический анализ гибридов мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) с пшеницей Тимофеева (*Triticum timopheevii* Zhuk.). *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2009;(2):131-138).

Zueva G.V. Features of the formation of the ear and male gametophyte of a wheat-rye amphiploid grown on coal ash (Osobennosti formirovaniya kolosa i muzhskogo gametofita pshenichno-rzhanogo amfiploida, vyrashchennogo na kamennougolnoy zole). *Scientific Notes of the Ural State University*. 1969;5(94):216-222. [in Russian] (Зуева Г.В Особенности формирования колоса и мужского гаметофита пшенично-ржаного амфиплоида, выращенного на каменноугольной золе. *Ученые записки Уральского государственного университета*. 1969;5(94):216-222).

Информация об авторах

Алла Анатольевна Торшилова, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Ботанический институт им. В.Л. Комарова Российской академии наук, 197022 Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 2, phoenix62@binran.ru, http://orcid.org/0000-0003-3727-6046

Жанна Викторовна Ивасенко, старший лаборант, Ботанический институт им. В.Л. Комарова Российской академии наук, 197022 Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 2, ZIvasenko@binran.ru, http://orcid.org/0000-0002-8183-4132

Галина Евгеньевна Титова, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующая лабораторией, Ботанический институт им. В.Л. Комарова Российской академии наук, 197022 Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 2, GTitova@binran.ru, http://orcid.org/0000-0002-6159-3087

Надежда Николаевна Чикида, кандидат сельскохозяйственных 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.chikida@vir.nw.ru, http://orcid.org/0000-0002-9698-263X

Information about the authors

Alla A. Torshilova, Cand. Sci. (Biology), Researcher, Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences, 2 Professora Popova Street, St. Petersburg 197022, Russia, phoenix62@binran.ru, http://orcid.org/0000-0003-3727-6046

Zhanna V. Ivasenko, Senior Laboratory Assistant, Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences, 2 Professora Popova Street, St. Petersburg 197022, Russia, ZIvasenko@binran.ru, http://orcid.org/0000-0002-8183-4132

Galina E. Titova, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Head of a Laboratory, Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences, 2 Professora Popova Street, St. Petersburg 197022, Russia, GTitova@binran.ru, http://orcid.org/0000-0002-6159-3087

Nadejda N. Chikida, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, n.chikida@vir.nw.ru, http://orcid.org/0000-0002-9698-263X

Вклад авторов: Торшилова А. А. – исследование и анализ постоянных препаратов с использованием световой микроскопии; интерпретация полученных данных. Ивасенко Ж. В. – подготовка и частичный анализ постоянных препаратов. Титова Г. Е. – исследование и анализ постоянных препаратов с использованием световой микроскопии; интерпретация полученных данных; внесение некоторых дополнений. Чикида Н. Н. – формулировка общей идеи исследования; отбор растительного материала.

Contribution of the authors: Torshilova A. A. – research and analysis of permanent slides using light microscopy; interpretation of the obtained data. Ivasenko Zh. V. – preparation and partial analysis of permanent slides. Titova G. E. – research and analysis of permanent slides using light microscopy; interpretation of the obtained data; some supplementary revisions. Chikida N. N. – formulation of the general research concept; selection of plant material.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 21.11.2025; одобрена после рецензирования 01.01.2026; принята к публикации 30.01.2026.
The article was submitted on 21.11.2025; approved after reviewing on 01.01.2026; accepted for publication on 30.01.2026.

СИСТЕМАТИКА, ФИЛОГЕНИЯ И ГЕОГРАФИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 634.1:631.52
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o14

CC BY

Номенклатурные стандарты сортов яблони селекции Северо-Кавказского ФНЦ садоводства, виноградарства, виноделия

Е. В. Ульяновская[1], Т. В. Богданович[1], Е. А. Чернуцкая[1], Г. В. Таловина[2]

[1] Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, Краснодар, Россия

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

Автор, ответственный за переписку: Елена Владимировна Ульяновская, ulyanovskaya_e@mail.ru

Созданы гербарные образцы номенклатурных стандартов шести сортов яблони (*Malus domestica* Borkh.) селекции Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия (СКФНЦСВВ), в том числе сорта ‘Ренет Кубанский’ (WIR-108872), и сортов с иммунитетом к парше (*Venturia inaequalis* (Cooke) G. Winter) по гену *Rvi6* совместной селекции с Всероссийским научно-исследовательским институтом селекции плодовых культур (ВНИИСПК): ‘Амулет’ (WIR-104534), ‘Марго’ (WIR-108870), ‘Орфей’ (WIR-108871), ‘Талисман’ (WIR-108873), ‘Юнона’ (WIR-108875).
Растительный сортовой материал яблони идентифицирован и отобран в коллекционном фонде СКФНЦСВВ в периоды цветения и плодоношения; по каждому сорту подготовлен гербарий цветков (кроме ‘Ренет Кубанский’), листьев, плодов и однолетних побегов, сделано описание основных помологических, хозяйственных и адаптивно-значимых признаков, приложены фотографии отдельных частей растения. Гербарные образцы оформлены согласно рекомендациям Международного кодекса номенклатуры культурных растений (ICNCP), подготовлены для бессрочного хранения в Гербарии культурных растений мира, их диких родичей и сорных растений (WIR), в Национальном центре генетических ресурсов растений Российской Федерации и зарегистрированы в базе данных «Гербарий ВИР».
Публикуемые номенклатурные стандарты сортов яблони служат официальным научным документом селекционных достижений, обеспечат сохранение общедоступной, подлинной и оригинальной генетической, таксономической и морфологической информации о южных отечественных сортах культуры, могут быть использованы для идентификации и подтверждения подлинности сортов яблони отечественной селекции при размножении и использовании в промышленных насаждениях.

Ключевые слова: гербарный образец, сорт, *Malus domestica* Borkh., Северо-Кавказский регион садоводства, Гербарий WIR

Благодарности: работа выполнена в рамках реализации Программы развития Национального центра генетических ресурсов растений по соглашению с Минобрнауки России от 26 февраля 2025 г. № 075-02-2025-1584. Растительный материал для гербария был собран под эгидой проекта развития Биоресурсной сетевой коллекции.

Для цитирования: Ульяновская Е.В., Богданович Т.В., Чернуцкая Е.А., Таловина Г.В. Номенклатурные стандарты сортов яблони селекции Северо-Кавказского ФНЦ садоводства, виноградарства, виноделия. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(1):238-251. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o14

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

© Ульяновская Е.В., Богданович Т.В., Чернуцкая Е.А., Таловина Г.В., 2026

SYSTEMATICS, PHYLOGENY AND GEOGRAPHY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o14

Nomenclatural standards for apple-tree cultivars developed at the North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making

Elena V. Ulyanovskaya[1], Tatyana V. Bogdanovich[1], Evgenia A. Chernutskaya[1], Galina V. Talovina[2]

[1] *North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, Krasnodar, Russia*

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

Corresponding author: Elena V. Ulyanovskaya, ulyanovskaya_e@mail.ru

Nomenclatural standards were issued for 6 cultivars of *Malus domestica* Borkh. (apple tree) developed at the North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making (NCFSCHVW). In addition to 'Renet Kubanskiy' (WIR-108872), they included cultivars with immunity to scab (*Venturia inaequalis* (Cooke) G. Winter) controlled by the *Rvi6* gene, released cooperatively with the Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding (VNIISPK): 'Amulet' (WIR-104534), 'Margo' (WIR-108870), 'Orfey' (WIR-108871), 'Talisman' (WIR-108873), and 'Yunona' (WIR-108875).

The plant material of the apple-tree cultivars was identified and selected in the collection of the NCFSCHVW during the flowering and fruiting periods. An herbarium of flowers (except for 'Renet Kubanskiy'), leaves, fruits, and annotinous shoots was prepared for each cultivar, supplied with a description of main pomological, agronomic, and adaptively significant traits, and a photo of the plant's individual parts. Herbarium specimens, arranged in accordance with the recommendations of the International Code of Nomenclature for Cultivated Plants (ICNCP), were registered the databases and placed for perpetual storage in the WIR Herbarium of the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR) and the National Center for Plant Genetic Resources.

Each published nomenclatural standard for an apple-tree cultivar serves as an official scientific document certifying the breeding achievement and ensuring the perpetual preservation of the genuine and original genetic, taxonomic and morphological information on Southern domestic apple-tree cultivars. It can be used to verify such cultivar's authenticity during its propagation and cultivation in industrial plantings.

Keywords: herbarium specimen, cultivar, *Malus domestica* Borkh., North Caucasus horticultural region, WIR Herbarium

Acknowledgments: the work was done in the framework of the implementation of the Development Program of the National Center for Plant Genetic Resources under the agreement with the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation dated February 26, 2025, No. 075-02-2025-1584. The plant material for the herbarium was collected under the auspices of the Bioresource Network Collection development project.

For citation: Ulyanovskaya E.V., Bogdanovich T.V., Chernutskaya E.A., Talovina G.V. Nomenclatural standards for apple-tree cultivars developed at the North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(1):238-251. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o14

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Яблоня – адаптивная и устойчивая плодовая сельскохозяйственная культура, обеспечивающая урожаи высококачественных транспортабельных плодов с возможностью круглогодичного использования, характеризующаяся разнообразием и постоянным улучшением сортимента (Makarenko, 2019; Savelyeva et al., 2019; Kalinina et al., 2020; Minin et al., 2021; Sestras R., Sestras A., 2023). Эти положительные качества позволяют яблоне долгие годы удерживать бесспорное лидерство по распространению среди других культур в отрасли.

Развитие селекции и интродукции яблони на Северном Кавказе связано с именем Льва Михайловича Сергеева (1886–1980) – основателя научного направления «Интродукция, сортоизучение и селекция семечковых культур» научной школы «Южное садоводство» Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия (СКФНЦСВВ)[1], заложившего основы всей дальнейшей селекционной работы, внедрявшего различные методы селекции (комбинационная селекция, клоновый отбор, индуцированный мутагенез), создавшего новые сорта и значительный гибридный фонд (Sergeev et al., 1951). В 1950–60-е годы Л. М. Сергеевым по результатам селекционного отбора выделено 90 перспективных гибридов, переданы в государственное испытание 7 образцов, в районированный сортимент включены новые селекционные сорта: ‘Зеленка Сергеева’, ‘Боровинка Сергеева’, ‘Анис Кубанский’ (Sergeev, 1967). В дальнейшем из созданного им гибридного фонда яблони его ученики и последователи (Л. С. Наумова, С. Н. Артюх, Л. И. Дутова) выделили новые сорта, отвечающие современным требованиям интенсивного садоводства: ‘Ренет Кубанский’, ‘Кубанское Багряное’, ‘Прикубанское’, ‘Память Есаулу’, ‘Апорт АСС’ и др., до настоящего времени обладающие заслуженной популярностью в промышленном производстве не только Краснодарского края, но и региона Северного Кавказа (Ulyanovskaya, 2021).

Необходимость непрерывного совершенствования южного сортимента яблони, в том числе на основе адаптивных, качественных отечественных сортов, обусловлена важностью задач сохранения продовольственной безопасности России, импортозамещения в условиях ужесточения зарубежных санкций, а также растущими требованиями потребительского рынка к качеству, товарности и экологической чистоте плодов и плодовой продукции, постоянным развитием экономики региона, усилением влияния всего комплекса абио- и биотических стрессоров (Egorov et al., 2019; Satibalov, Nagudova, 2020; Sedov et al., 2021).

За прошедшие более девяти десятилетий селекционной работы в СКФНЦСВВ было создано 84 сорта яблони; 36 из них – в Государственном реестре селекционных достижений, допущенных к использованию по Северо-Кавказскому региону (https://gossortrf.ru/registry/gosudarstvennyy-reestr-selektsionnykh-dostizheniy-dopushchennykh-k-ispolzovaniyu-tom-1-sorta-rasteni). Более четырех десятилетий коллектив ученых ведет плодотворную совместную работу по программам «Селекция яблони на иммунитет к парше» и «Селекция яблони на полиплоидном уровне» с учеными Всероссийского научно-исследовательского института селекции плодовых культур (ВНИИСПК) под руководством академика РАН Е. Н. Седова.

Для того чтобы сохранить общедоступную, подлинную и оригинальную генетическую, таксономическую и морфологическую информацию о южных отечественных сортах, необходимо опубликовать номенклатурные стандарты сортов яблони – они послужат официальным научным документом селекционных достижений, обеспечат возможность идентификации и подтверждения подлинности сортов яблони отечественной селекции при размножении и использовании в промышленных насаждениях.

Научные исследования, направленные на разработку номенклатурных стандартов сортов яблони, были начаты в ВИР в 2018 г. (Bagmet et al., 2021; Bagmet, Shlyavas, 2021), а уже через четыре года, в 2022 г., данное направление, важнейшее для бессрочного хранения уникальной сортовой информации и возможности подтверждения оригинальности и подлинности вегетативно размножаемых сортов многолетних сельскохозяйственных растений, получило свое развитие и в СКФНЦСВВ. В крупнейшем научном учреждении региона Северного Кавказа были начаты исследования по разработке сортовых номенклатурных стандартов по плодовым культурам, в том числе яблоне.

Цель исследования – создание номенклатурных стандартов 6 сортов яблони селекции СКФНЦСВВ, из них 5 сортов – совместной селекции с ВНИИСПК, для бессрочного сохранения оригинальной, подлинной информации в Гербарии культурных растений мира, их диких родичей и сорных растений (WIR) Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР).

Материалы и методы

НИР по созданию номенклатурных стандартов сортов яблони выполнены коллективом ученых лаборатории сортоизучения и селекции садовых культур СКФНЦСВВ и отдела агроботаники и *in situ* сохранения генетических ресурсов растений ВИР.

Объекты исследования – 5 сортов с иммунитетом к парше (*Venturia inaequalis* (Cooke) G. Winter) по гену *Rvi6* совместной селекции СКФНЦСВВ и ВНИИСПК: ‘Амулет’, ‘Марго’, ‘Орфей’, ‘Талисман’, ‘Юнона’ и один сорт селекции СКФНЦСВВ ‘Ренет Кубанский’, высокоадаптивный к условиям Северо-Кавказского региона (табл. 1). Коллекционные насаждения яблони СКФНЦСВВ на подвое М9 (2002 г. посадки) расположены в г. Краснодаре, поселок отделения № 2 СКФНЦСВВ, Опытно-производственное хозяйство (ОПХ) «Центральное».

Гербаризацию растений проводили в фенофазы цветения и плодоношения под руководством селекционера Е. В. Ульяновской с использованием методики ВИР, описание сортовых признаков дано в соответствии с Международным классификатором СЭВ (International COMECON list..., 1989). Оформление номенклатурных стандартов отвечает требованиям Международного кодекса номенклатуры культурных растений (ICNCP) (Brickell et al., 2016). Фотографии всех сортов выполнены Е. В. Ульяновской, за исключением выполненных С. Н. Артюх фотоснимков плодов ‘Ренет Кубанский’, Т. В. Богданович – фото цветков ‘Юнона’. Каждый гербарный образец сорта яблони заверен подписью автора (эксперта) Е. В. Ульяновской, подтверждающей его подлинность. Гербарная этикетка каждого образца включает его номер в Герба-

[1] До 2017 г. – Северо-Кавказский зональный научно-исследовательский институт садоводства и виноградарства (СКЗНИИСиВ).

Таблица 1. Сорта яблони Северо-Кавказского региона РФ, выбранные для создания номенклатурных стандартов

Table 1. Apple-tree cultivars of the North Caucasus region of Russia selected for the development of nomenclatural standards

Название сорта / Cultivar name	Код в Госреестре / State Register code	Год внесения в Госреестр / Year when listed in the State Register	Регион допуска / Region admitted for usage
'Амулет' / 'Amulet'	–	ГСИ	6 – Северо-Кавказский / 6 – North Caucasus
'Марго' / 'Margo'	8853102	2019	тот же / same
'Орфей' / 'Orfey'	8853103	2019	тот же / same
'Ренет Кубанский' / 'Renet Kubanskiy'	8505136	1998	тот же / same
'Талисман' / 'Talisman'	9610500	2014	тот же / same
'Юнона' / 'Yunona'	9154602	2021	тот же / same

рии WIR; латинское название вида; название сорта; происхождение: название организации(-ий), где создан сорт; родительские формы; место сбора; дату сбора; ФИО коллекторов и эксперта.

Результаты и обсуждение

В результате проведенного совместного исследования коллектив ученых СКФНЦСВВ и ВИР разработал номенклатурные стандарты для 6 сортов яблони *Malus domestica* Borkh., которые переданы в Гербарий ВИР (WIR) и вошли в состав особо ценных гербарных образцов Национального центра генетических ресурсов растений РФ. В таблице 2 кратко представлены основные хозяйственно ценные признаки сортов (Egorov et al., 2019). Ниже даны описания номенклатурных стандартов.

1. **Сорт 'Амулет' – 'Amulet'. Nomenclatural standard.** Происхождение: Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия совместно с Всероссийским научно-исследовательским институтом селекции плодовых культур. Получен от скрещивания сортов 'Редфри' × 'Папировка Тетраплоидная'. Авторы: Дутова Л.И., Седов Е.Н., Ульяновская Е.В., Жданов В.В., Рагулина Т.В., Седышева Г.А., Махно Л.В., Причко Т.Г. Репродукция: ОПХ «Центральное» СКФНЦСВВ. 19.04.2022 (цветки), 5.07.2022 (плоды), 6.09.2022 (однолетний побег). Собрали: Ульяновская Е.В., Чернуцкая Е.А., Богданович Т.В. Определила: Ульяновская Е.В. – Origin: North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making; Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding. Obtained: 'Redfree' × 'Papirovka Tetraploidnaya'. Authors: Dutova L.I., Sedov E.N., Ulyanovskaya E.V., Zhdanov V.V., Ragulina T.V., Sedysheva G.A., Makhno L.V., Prichko T.G. Reproduction: Experimental Production Farm "Tsentralnoye", NCFSCHVW. 19.04.2022 (flowers), 5.07.2022 (fruits), 6.09.2022 (first-year shoot). Collected by: Ulyanovskaya E.V., Chernutskaya E.A., Bogdanovich T.V. Identified by: Ulyanovskaya E.V. **WIR-104534** (рис. 1).

Примечание: гербарный образец представлен на двух листах.

2. **Сорт 'Марго' – 'Margo'. Nomenclatural standard.** Происхождение: Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия совместно с Всероссийским научно-исследовательским институтом селекции плодовых культур. Получен от скрещивания сортов 'Голден Делишес Тетраплоидный' × [F_2 *Malus floribunda* 821 × 'Голден Делишес']. Авторы: Ульяновская Е.В., Седов Е.Н., Дутова Л.И., Жданов В.В., Серова З.М., Рагулина Т.В., Махно Л.В., Причко Т.Г. Репродукция: ОПХ «Центральное» СКФНЦСВВ. 17.04.2023 (цветки), 5.07.2022 (плоды), 6.09.2022 (однолетний побег). Собрали: Ульяновская Е.В., Чернуцкая Е.А., Богданович Т.В. Определила: Ульяновская Е.В. – Origin: North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making; Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding. Obtained by crossing the cultivars: 'Golden Delicious Tetraploidny' × (F_2 *Malus floribunda* 821 × 'Golden Delicious'). Authors: Ulyanovskaya E.V., Sedov E.N., Dutova L.I., Zhdanov V.V., Serova Z.M., Ragulina T.V., Makhno L.V., Prichko T.G. Reproduction: Experimental Production Farm "Tsentralnoye", NCFSCHVW. 17.04.2023 (flowers), 5.07.2022 (fruits), 6.09.2022 (first-year shoot). Collected by: Ulyanovskaya E.V., Chernutskaya E.A., Bogdanovich T.V. Identified by: Ulyanovskaya E.V. **WIR-108870** (рис. 2).

Примечание: гербарный образец представлен на двух листах.

3. **Сорт 'Орфей' – 'Orfey'. Nomenclatural standard.** Происхождение: Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия совместно с Всероссийским научно-исследовательским институтом селекции плодовых культур. Получен от скрещивания сортов 'Голден Делишес Тетраплоидный' × ['Вольф Ривер' × ('Вольф Ривер' × *Malus atrosanguinea* 804/240-57)]. Авторы: Ульяновская Е.В., Седов Е.Н., Дутова Л.И., Жданов В.В., Серова З.М., Рагулина Т.В., Махно Л.В., Причко Т.Г. Репродукция: ОПХ «Центральное» СКФНЦСВВ. 17.04.2023 (цветки), 5.07.2022 (плоды), 6.09.2022 (однолетний побег). Собрали: Ульяновская Е.В., Чернуцкая Е.А., Богданович Т.В. Определила: Ульяновская Е.В. – Origin: North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making; Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding. Obtained by crossing the cultivars: 'Golden Delicious Tetraploidny' × ['Wolf River' × ('Wolf River' × *Malus atrosanguinea* 804/240-57)]. Authors: Ulyanovskaya E.V., Sedov E.N., Dutova L.I., Zhdanov V.V., Serova Z.M., Ragulina T.V.,

Таблица 2. **Агробиологические признаки сортов яблони**

Table 2. **Agrobiological characteristics of apple-tree cultivars**

Признак / Trait	**‘Амулет’ / ‘Amulet’**	**‘Марго’ / ‘Margo’**	**‘Орфей’ / ‘Orfey’**	**‘Ренет Кубанский’ / ‘Renet Kubanskiy’**	**‘Талисман’ / ‘Talisman’**	**‘Юнона’ / ‘Yunona’**
Масса плода средняя/максимальная, г / Average/maximum fruit weight, g	162/190	234/325	203/292	180/250	210/365	285/367
Оценка вкуса, балл / Taste rating score, points	4,7		4,7–4,8	4,8	4,7–4,8	4,8
Форма плода / Fruit shape	Округлая / Round	Продолговатая / Oblong	Продолговато-коническая / Oblong-conical	Округло-усеченно-коническая / Rounded truncated conical	Репчатая / Napiform	Округлая / Round
Основная окраска плода / Basic fruit color	Зелено-желтая / Green-yellow	Зеленовато-желтая / Greenish yellow		Светло-зеленоватая / Light greenish	Зеленовато-желтая / Greenish yellow	
Покровная окраска плода / Fruit skin color	Ярко-малиновая / Bright crimson	Отсутствует / Absent	Малиновая / Crimson	Отсутствует / Absent	Ярко-малиновая / Bright crimson	
Интенсивность покровной окраски / Skin color intensity	Высокая / High	–	Средняя / Medium	–	Средняя / Medium	
Окраска мякоти плода / Fruit pulp color	Кремовая / Cream-colored		Кремоватая / Whitish cream-colored	Зеленоватая / Greenish	Кремоватая / Whitish cream-colored	
Скороплодность / Fruiting precocity	1–2-й год	2–3-й год	2-й год	2–3-й год	2-й год	2–3-й год
Зимостойкость / Winter hardiness	Высокая / High				Выше средней / Above the medium level	Высокая / High
Засухоустойчивость / Drought resistance	Высокая / High				Выше средней / Above the medium level	Высокая / High
Устойчивость к парше / Scab resistance	Иммунитет / Immunity			Средняя / Medium	Иммунитет / Immunity	
Устойчивость к мучнистой росе / Powdery mildew resistance	Высокая / High			Средняя / Medium	Высокая / High	Выше средней / Above the medium level

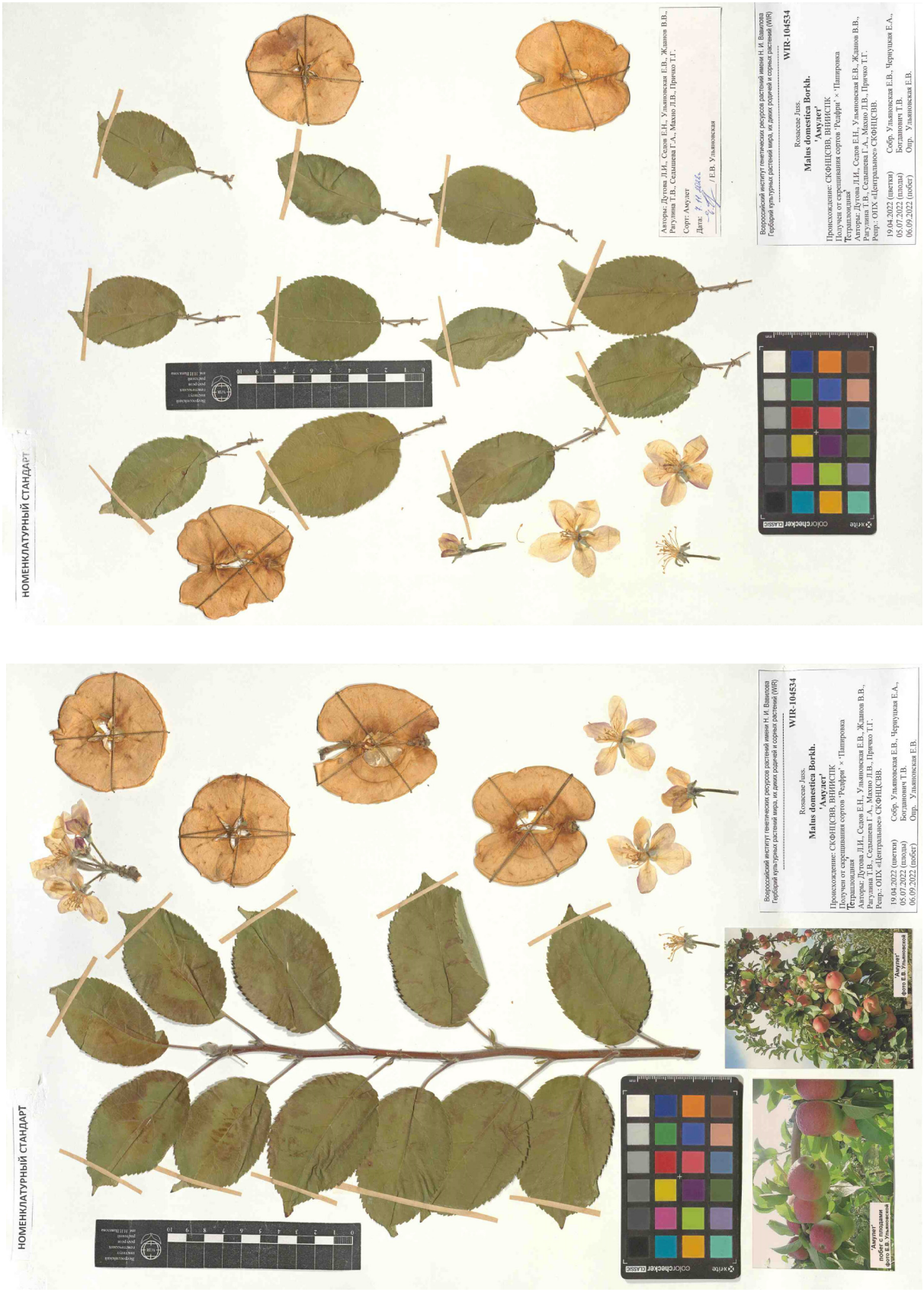


Рис. 1. Номенклатурный стандарт *Malus domestica* Borkh. 'Амулет' (WIR-104534) – два гербарных листа

Fig. 1. Nomenclatural standard for *Malus domestica* Borkh. 'Amulet' (WIR-104534) – two herbarium sheets

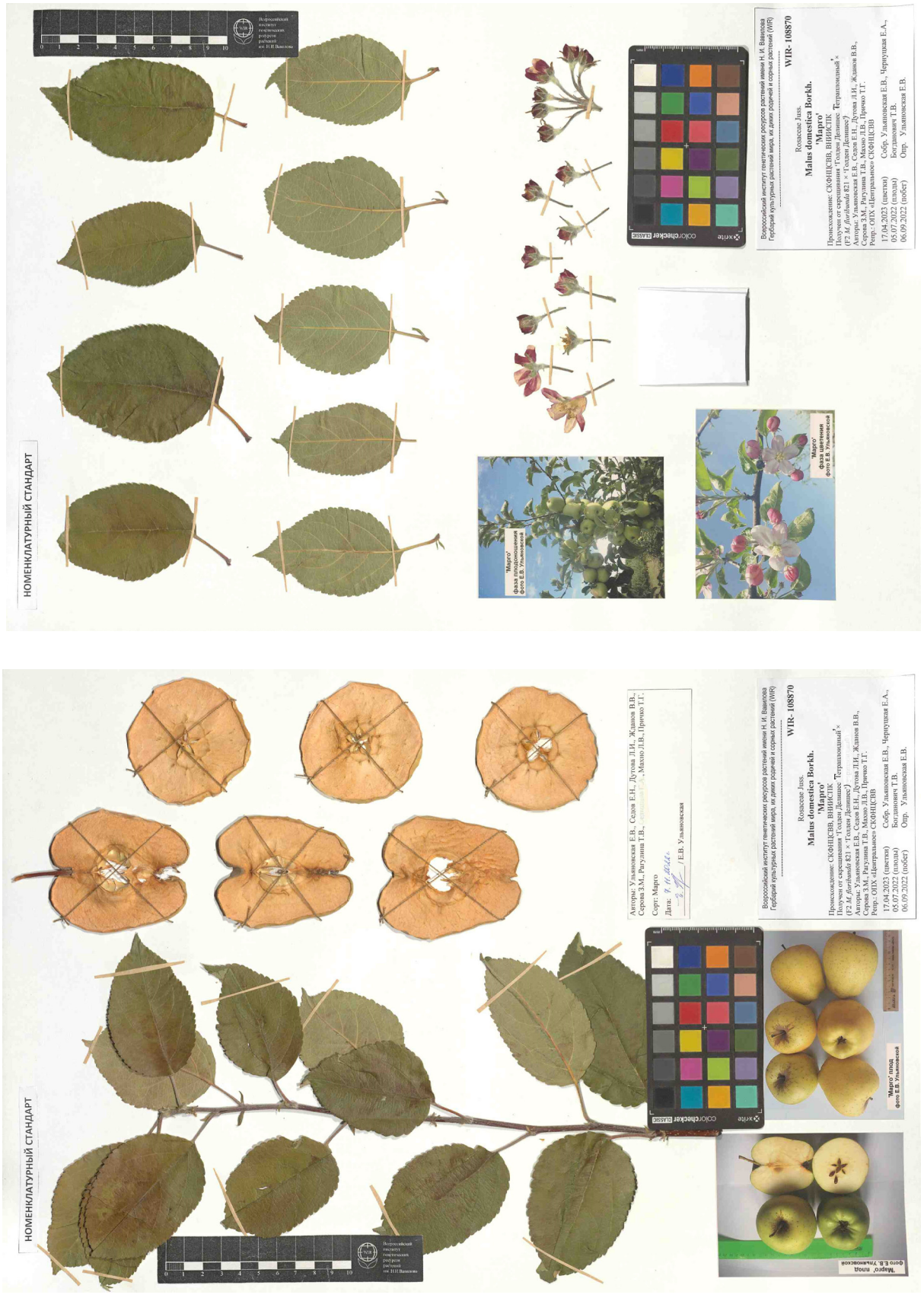


Рис. 2. Номенклатурный стандарт *Malus domestica* Borkh. 'Mapro' (WIR-108870) – два гербарных листа

Fig. 2. Nomenclatural standard for *Malus domestica* Borkh. 'Margo' (WIR-108870) – two herbarium sheets

Makhno L.V., Prichko T.G. Reproduction: Experimental Production Farm "Tsentralnoye", NCFSCHVW. 17.04.2023 (flowers), 5.07.2022 (fruits), 6.09.2022 (first-year shoot). Collected by: Ulyanovskaya E.V., Chernutskaya E.A., Bogdanovich T.V. Identified by: Ulyanovskaya E.V. **WIR-108871** (рис. 3).

Примечание: гербарный образец представлен на двух листах.

4. **Сорт 'Ренет Кубанский' – 'Renet Kubanskiy'. Nomenclatural standard.** Происхождение: Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия. Получен путем клоновой и мутационной селекции сорта 'Ренет Симиренко'. Авторы: Артюх С.Н., Дутова Л.И., Киртбая Е.К. Репродукция: ОПХ «Центральное» СКФНЦСВВ. 5.07.2022 (плоды), 6.09.2022 (однолетний побег). Собрали: Ульяновская Е.В., Чернуцкая Е.А., Богданович Т.В. Определила: Ульяновская Е.В. – Origin: North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making. Obtained from clone and mutant breeding of the cultivar 'Renet Simirenko'. Authors: Artyukh S.N., Dutova L.I., Kirtbaya E.K. Reproduction: Experimental Production Farm "Tsentralnoye", NCFSCHVW. 5.07.2022 (fruits), 6.09.2022 (first-year shoot). Collected by: Ulyanovskaya E.V., Chernutskaya E.A., Bogdanovich T.V. Identified by: Ulyanovskaya E.V. **WIR-108872** (рис. 4).

Примечание: гербарный образец представлен на двух листах.

5. **Сорт 'Талисман' – 'Talisman'. Nomenclatural standard.** Происхождение: Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия совместно с Всероссийским научно-исследовательским институтом селекции плодовых культур. Получен от скрещивания сортов 'Редфри' × 'Папировка Тетраплоидная'. Авторы: Дутова Л.И., Седов Е.Н., Жданов В.В., Ульяновская Е.В., Рагулина Т.В., Седышева Г.А., Махно Л.В., Причко Т.Г. Репродукция: ОПХ «Центральное» СКФНЦСВВ. 19.04.2022 (цветки), 11.07.2023 (плоды), 6.09.2022 (однолетний побег). Собрали: Ульяновская Е.В., Чернуцкая Е.А., Богданович Т.В. Определила: Ульяновская Е.В. – Origin: North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making; Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding. Obtained by crossing the cultivars: 'Redfree' × 'Papirovka Tetraploidnaya'. Authors: Dutova L.I., Sedov E.N., Zhdanov V.V., Ulyanovskaya E.V., Ragulina T.V., Sedysheva G.A., Makhno L.V., Prichko T.G. Reproduction: Experimental Production Farm "Tsentralnoye", NCFSCHVW. 19.04.2022 (flowers), 11.07.2023 (fruits), 6.09.2022 (first-year shoot). Collected by: Ulyanovskaya E.V., Chernutskaya E.A., Bogdanovich T.V. Identified by: Ulyanovskaya E.V. **WIR-108873** (рис. 5).

Примечание: гербарный образец представлен на двух листах.

6. **Сорт 'Юнона' – 'Yunona'. Nomenclatural standard.** Происхождение: Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия совместно с Всероссийским научно-исследовательским институтом селекции плодовых культур. Получен от скрещивания сортов 'Прима' × 'Уэлси Тетраплоидный'. Авторы: Дутова Л.И., Седов Е.Н., Ульяновская Е.В., Жданов В.В., Рагулина Т.В., Седышева Г.А., Серова З.М., Махно Л.В., Причко Т.Г. Репродукция: ОПХ «Центральное» СКФНЦСВВ. 17.04.2023 (цветки), 11.07.2023 (плоды), 6.09.2022 (однолетний побег). Собрали: Ульяновская Е.В., Чернуцкая Е.А., Богданович Т.В. Определила: Ульяновская Е.В. – Origin: North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making; Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding. Obtained by crossing the cultivars: 'Prima' × 'Welsie Tetraploidny'. Authors: Dutova L.I., Sedov E.N., Ulyanovskaya E.V., Zhdanov V.V., Ragulina T.V., Sedysheva G.A., Serova Z.M., Makhno L.V., Prichko T.G. Reproduction: Experimental Production Farm "Tsentralnoye", NCFSCHVW. 17.04.2023 (flowers), 11.07.2023 (fruits), 6.09.2022 (first-year shoot). Collected by: Ulyanovskaya E.V., Chernutskaya E.A., Bogdanovich T.V. Identified by: Ulyanovskaya E.V. **WIR-108875** (рис. 6).

Примечание: гербарный образец представлен на двух листах.

Кроме того, подготовлен и передан в Гербарий ВИР гербарный ваучер *Malus domestica* Borkh. сорта **'Флорина'**, оригинатором которого является СКФНЦСВВ. Включен в Госреестр по Северо-Кавказскому, Центрально-Черноземному и Нижневолжскому регионам с 2000 г. Происхождение: сорт создан в США путем многократных скрещиваний с использованием *Malus floribunda* 821 и сортов 'Ром Бьюти', 'Голден Делишес', 'Старкинг', 'Джонатан'. Репродукция: ОПХ «Центральное» СКФНЦСВВ. 5.07.2022 (плод), 6 .09.2022 (однолетний побег, лист), 17.04.2023 (цветок). Собрали: Ульяновская Е.В., Чернуцкая Е.А., Богданович Т.В. Определила Ульяновская Е.В. **WIR-108874**.

Этот иммунный к парше зимний сорт яблони за 25 лет культивирования не потерял своей популярности у потребителей и производителей плодовой продукции на юге России благодаря своим положительным характеристикам: высокая товарность, отличные вкусовые достоинства и длительный период хранения плодов практически без потери качества, иммунитет к парше, повышенная продуктивность. Несмотря на имеющиеся недостатки: раскидистая, широко-округлая, достаточно загущенная крона, недостаточная зимостойкость в условиях региона, периодичность плодоношения, склонность к мельчанию плодов, сорт 'Флорина' по-прежнему востребован в производстве, пополняет конвейер иммунных к парше зимних сортов, а также используется в селекции как донор иммунитета к парше (ген *Rvi6*), обладающий высоким качеством и длительной лежкоспособностью плодов.

Заключение

В результате совместных исследований ученых СКФНЦСВВ и ВИР с учетом основных положений Международного кодекса номенклатуры культурных растений (ICNCP) разработаны и обнародованы номенклатурные стандарты 6 сортов яблони: 'Амулет' (WIR-104534), 'Марго' (WIR-108870), 'Орфей' (WIR-108871), 'Талисман' (WIR-108873), 'Юнона' (WIR-108875), созданных в СКФНЦСВВ совместно с ВНИИСПК; 'Ренет Кубанский' (WIR-108872) селекции СКФНЦСВВ. Также подготовлен гербарный ваучер для сорта зарубежной селекции 'Флорина' (WIR-108874), оригинатор – СКФНЦСВВ. Подготовлен гербарий сортов, их фотографии и описание в СКФНЦСВВ, в ВИР гербарный материал яблони оформлен и зарегистрирован в базе данных «Гербарий ВИР» в количестве 7 образцов (14 гербарных листов) и передан для бессрочного хранения в Гербарии культурных растений мира, их диких родичей и сорных растений ВИР (WIR); номенклатурные стандарты сортов вошли в число особо ценных гербарных образцов Национального центра генетических ресурсов растений РФ.

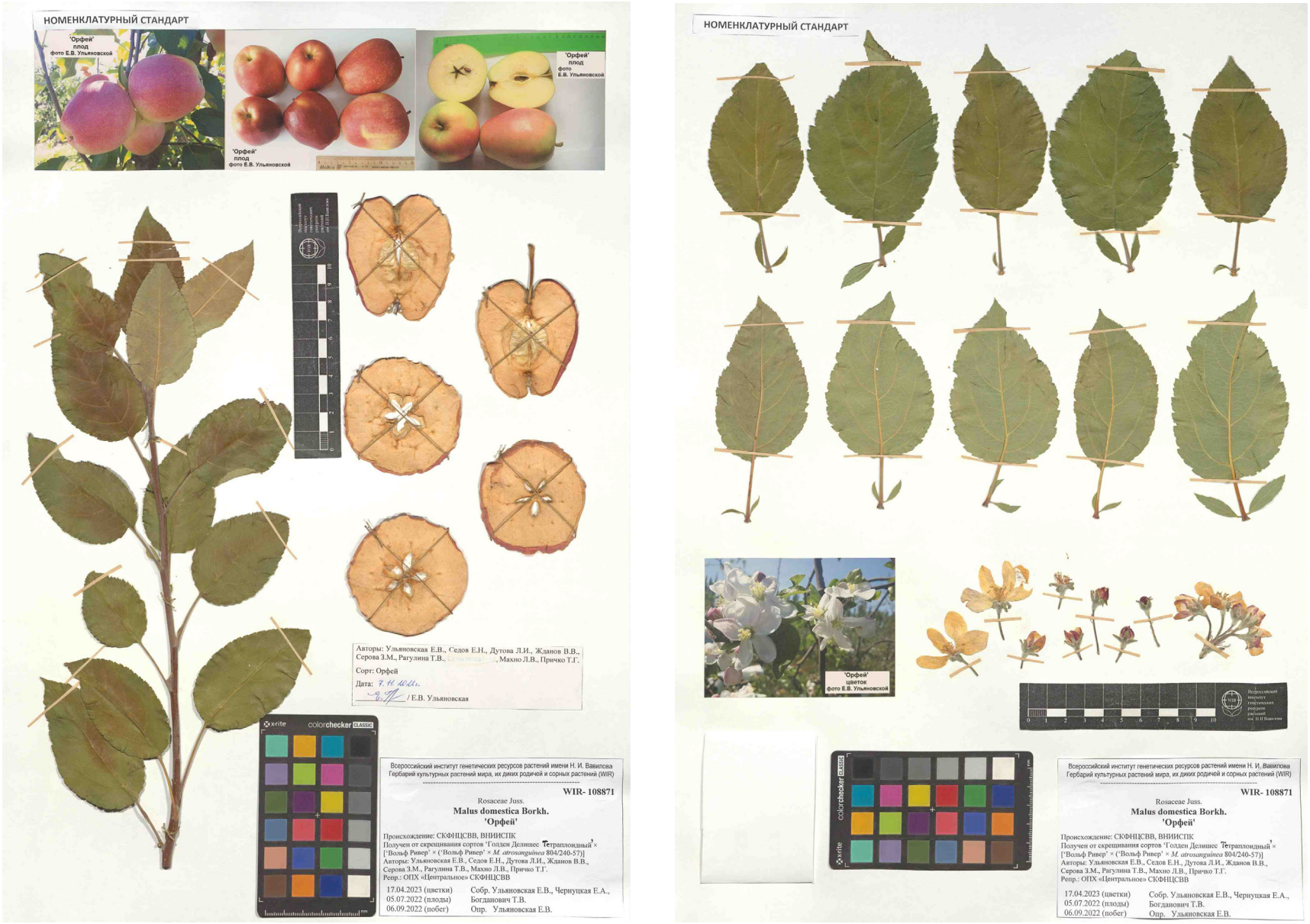


Рис. 3. **Номенклатурный стандарт *Malus domestica* Borkh. ‘Орфей’ (WIR-108871) – два гербарных листа**

Fig. 3. **Nomenclatural standard for *Malus domestica* Borkh. ‘Orfey’ (WIR-108871) – two herbarium sheets**



Рис. 4. **Номенклатурный стандарт *Malus domestica* Borkh. ‘Ренет Кубанский’ (WIR-108872) – два гербарных листа**

Fig. 4. **Nomenclatural standard for *Malus domestica* Borkh. ‘Renet Kubanskiy’ (WIR-108872) – two herbarium sheets**



Рис. 5. Номенклатурный стандарт *Malus domestica* Borkh. 'Талисман' (WIR-108873) – два гербарных листа
Fig. 5. Nomenclatural standard for *Malus domestica* Borkh. 'Talisman' (WIR-108873) – two herbarium sheets

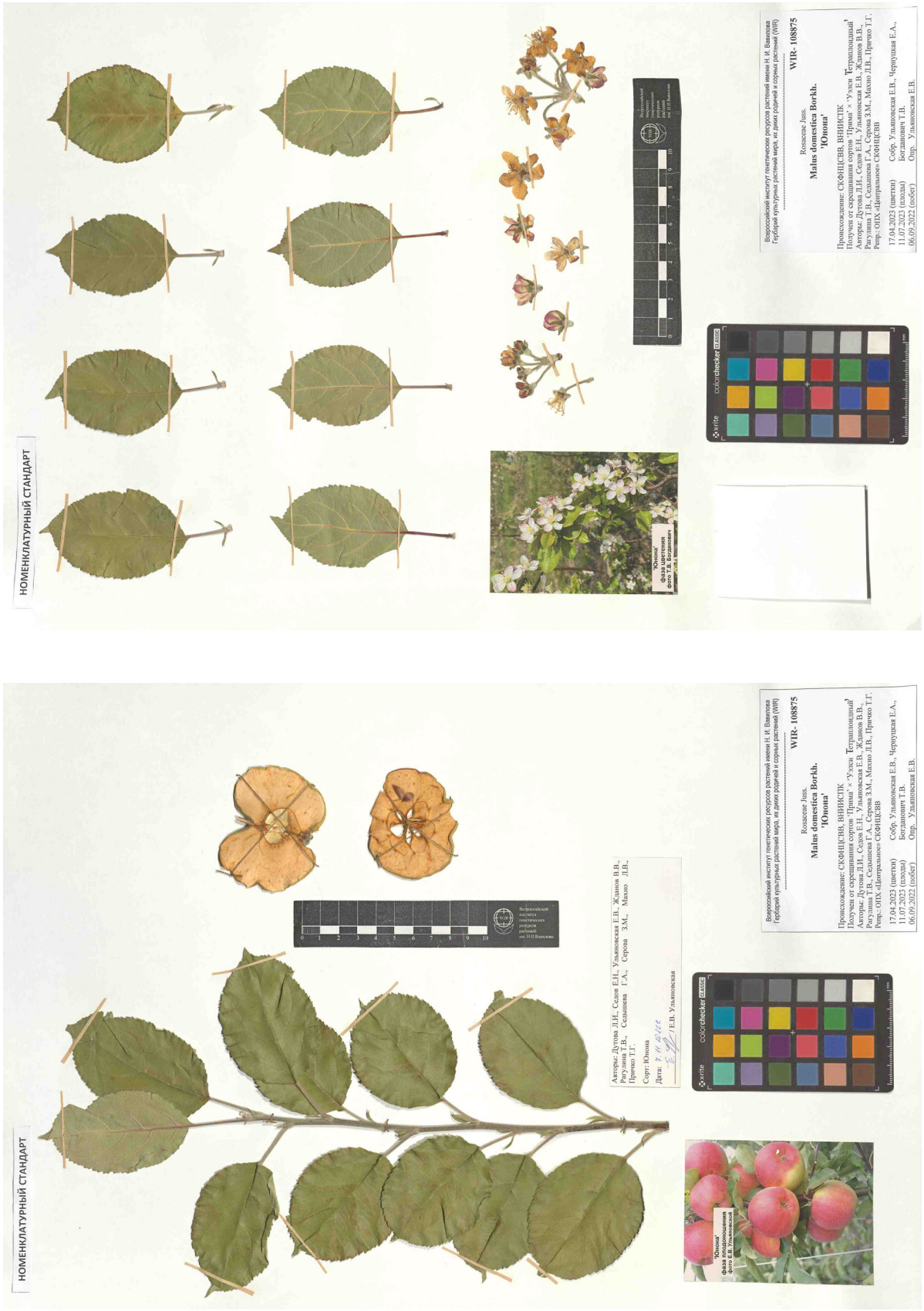


Рис. 6. Номенклатурный стандарт *Malus domestica* Borkh. 'Юнона' (WIR-108875) – два гербарных листа
Fig. 6. Nomenclatural standard for *Malus domestica* Borkh. 'Yunona' (WIR-108875) – two herbarium sheets

References / Литература

Bagmet L.V., Chepinoga I.S., Trifonova A.A., Boris K.V., Shlyavas A.V. Nomenclature standards and DNA barcoding of apple varieties originated by VIR Crimean Experimental Breeding Station. *Horticulture and Viticulture*. 2021;(6):5-16. [in Russian] (Багмет Л.В., Чепинога И.С., Трифонова А.А., Борис К.В., Шлявас А.В. Номенклатурные стандарты и генетические паспорта сортов яблони селекции Крымской опытно-селекционной станции ВИР. *Садоводство и виноградарство*. 2021;(6):5-16). DOI: 10.31676/0235-2591-2021-6-5-16

Bagmet L.V., Shlyavas A.V. Nomenclatural standards of apple cultivars bred at the Pavlovsk experiment station of VIR. *Vavilovia*. 2021;4(1):3-24. [in Russian] (Багмет Л.В., Шлявас А.В. Номенклатурные стандарты сортов яблони селекции Павловской опытной станции ВИР. *Vavilovia*. 2021;4(1):3-24). DOI: 10.30901/2658-3860-2021-1-3-24

Brickell C.D., Alexander C., Cubey J.J., David J.C., Hoffman M.H.A., Leslie A.C., Malécot V., Jin X. (eds). International Code of Nomenclature for Cultivated Plants. 9th ed. *Scripta Horticulturae*. 2016;18:1-190.

Egorov E.A., Zaremuk R.S., Ulyanovskaya E.V., Artyukh S.N., Alyokhina E.M., Lugovskoy A.P., Mozhar N.V., Dolya Yu.A., Yakovenko V.V., Lapshin V.I., Kuznetsova A.P., Tyshchenko E.L., Ilnitskaya E.T., Kovalenko A.G., Efimova I.L., Nudga T.A. Domestic cultivars of horticultural crops and grapes for the south of Russia (Otechestvennye sorta sadovykh kultur i vinograda dlya yuga Rossii). Krasnodar: NCFSCHVW; 2019. [in Russian] (Егоров Е.А., Заремук Р.Ш., Ульяновская Е.В., Артюх С.Н., Алехина Е.М., Луговской А.П., Можар Н.В., Доля Ю.А., Яковенко В.В., Лапшин В.И., Кузнецова А.П., Тыщенко Е.Л., Ильницкая Е.Т., Коваленко А.Г., Ефимова И.Л., Нудьга Т.А. Отечественные сорта садовых культур и винограда для юга России. Краснодар: СКФНЦСВВ; 2019).

International COMECON list of descriptors for the subfamily Maloideae (genera *Malus* Mill., *Pyrus* L., *Cydonia* Mill.). Leningrad; 1989. [in Russian] (Широкий унифицированный классификатор СЭВ подсемейства Maloideae родов *Malus* Mill., *Pyrus* L., *Cydonia* Mill. Ленинград; 1989).

Kalinina O.V., Burmenko Yu.V., Svistunova N.Yu. Directions in modern apple tree breeding (*Malus* Mill.). *Horticulture and Viticulture*. 2020;(6):5-11. [in Russian] (Калинина О.В., Бурменко Ю.В., Свистунова Н.Ю. Направления в современной селекции яблони (*Malus* Mill.). *Садоводство и виноградарство*. 2020;(6):5-11). DOI: 10.31676/0235-2591-2020-6-5-11

Makarenko S.A. The priority apple breeding directions for the areas with severe climatic conditions. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2019;8(178):28-35. [in Russian] (Макаренко С.А. Приоритетные направления селекции яблони для районов с суровыми климатическими условиями. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2019;8(178):28-35).

Minin A.N., Kuznetsov A.A., Antipenko M.I., Savin E.Z., Sobolev G.I., Gaetsky M.P., Dulov M.I., Blednykh O.V., Sergeev M.S., Bystrova E.D., Zaika A.S., Maltseva M.V., Nikiforova O.I. Horticulture in the Middle Volga region: a collective monograph (Sadovodstvo v Srednem Povolzhye: kollektivnaya monografiya). A.N. Minin (ed.). Samara: Slovo; 2021. [in Russian] (Минин А.Н., Кузнецов А.А., Антипенко М.И., Савин Е.З., Соболев Г.И., Гаецкий М.П., Дулов М.И., Бледных О.В., Сергеев М.С., Быстрова Е.Д., Заика А.С., Мальцева М.В., Никифорова О.И. Садоводство в Среднем Поволжье: коллективная монография / под ред. А.Н. Минина. Самара: Слово; 2021).

Satibalov A.V., Nagudova L.Kh. Disease-resistant apple and pear cultivars for the production of environment-friendly products (Ustoychivye k boleznyam sorta yabloni i grushi dlya proizvodstva ekologicheski bezopasnoy produktsii). In: *Science, Education and Innovations for the Agro-Industrial Complex: Status, Problems, and Prospects (Nauka, obrazovaniye i innovatsii dlya APK: sostoyaniye, problemy i perspektivy). Proceedings of the VI International Scientific and Practical Online Conference; Maikop, November 25, 2020*. Maikop: Magarin O.G.; 2020. p.612-615. [in Russian] (Сатибалов А.В., Нагудова Л.Х. Устойчивые к болезням сорта яблони и груши для производства экологически безопасной продукции. В кн.: *Наука, образование и инновации для АПК: состояние, проблемы и перспективы. Материалы VI Международной научно-практической онлайн-конференции; Майкоп, 25 ноября 2020 года*. Майкоп: Магарин О.Г.; 2020. С.612-615). URL: https://mkgtu.ru/upload/nauka/konferentsii/sbornik_mgtu_2020_sborka_676str.pdf [дата обращения: 15.05.2025].

Savelyeva N.N., Yushkov A.N., Zemisov A.S., Chivilev V.V., Lyzhin A.S. Progress in apple breeding at the I.V. Michurin Federal Scientific Center. The role of the cultivar in modern horticulture (Uspekhi selektsii yabloni v FNTs im. I.V. Michurina. Rol sorta v sovremennom sadovodstve). In: *Proceedings of the International Scientific and Methodological Online Conference Dedicated to the 70th Birthday of Prof. N.I. Savelyev, Full Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Agricultural Sciences; Michurinsk*. Voronezh; 2019. p.248-253. [in Russian] (Савельева Н.Н., Юшков А.Н., Земисов А.С., Чивилев В.В., Лыжин А.С. Успехи селекции яблони в ФНЦ им. И.В. Мичурина. Роль сорта в современном садоводстве. В кн.: *Материалы Международной научно-методической дистанционной конференции, посвященной 70-летию со дня рождения академика РАН, доктора сельскохозяйственных наук, профессора Н. И. Савельева; Мичуринск*. Воронеж; 2019. С.248-253).

Sedov E.N., Yanchuk T.V., Korneeva S.A. The best apple cultivars created in VNIISPK for modern gardening. *Contemporary Horticulture*. 2021;(2):1-13. [in Russian] (Седов Е.Н., Янчук Т.В., Корнеева С.А. Лучшие сорта яблони, созданные во ВНИИСПК для современного садоводства. *Современное садоводство*. 2021;(2):1-13). DOI: 10.52415/23126701_2021_0201

Sergeev L.M. The problem of improving the assortment of apple trees for Krasnodar Territory (Problema uluchsheniya sortimenta yablon v Krasnodarskom kraye). In: *Problems of Horticulture in the North Caucasus* (*Problemy sadovodstva Severnogo Kavkaza*)*: Conference Proceedings.* Krasnodar: North Caucasus Zonal Research Institute of Horticulture and Viticulture; 1967. p.65-72. [in Russian] (Сергеев Л.М. Проблема улучшения сортимента яблони в Краснодарском крае. В кн.: *Проблемы садоводства Северного Кавказа. Материалы конференции*. Краснодар: СКЗНИИСиВ; 1967. С.65-72).

Sergeev L.M., Kolesnikov M.A., Motovilov B.A. The best cultivars of fruit trees in Kuban (Luchshiye sorta plodovykh porod na Kubani). In: *Collection of Papers of the Krasnodar Regional Publishing House (Sbornik trudov Krasnodarskogo krayevogo knigoizdatelstva)*. Krasnodar; 1951. p.216. [in Russian] (Сергеев Л.М., Колесников М.А., Мотовилов Б.А. Лучшие сорта плодовых пород на Кубани.

В кн.: *Сборник трудов Краснодарского краевого книгоиздательства*. Краснодар; 1951. С.216).

Sestras R.E., Sestras A.F. Quantitative traits of interest in apple breeding and their implications for selection. *Plants (Basel)*. 2023;12(4):903. DOI: 10.3390/plants12040903

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: 30.05.2025].

Ulyanovskaya Y.V. Use of the apple gene pool of North Caucasus Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Winemaking for the breeding improvement of the southern sortiment. *Pomiculture and Small Fruits Culture in Russia*. 2021;66(1):30-41. [in Russian] (Ульяновская Е.В. Использование генофонда яблони Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства виноградарства и виноделия для селекционного совершенствования южного сортимента. *Плодоводство и ягодоводство России*. 2021;66(1):30-41). DOI: 10.31676/2073-4948-2021-66-30-41

Информация об авторах

Елена Владимировна Ульяновская, доктор сельскохозяйственных наук, заведующая лабораторией, Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, 350901 Россия, Краснодар, ул. 40 лет Победы, 39, ulyanovskaya_e@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3987-7363

Татьяна Валерьевна Богданович, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, 350901 Россия, Краснодар, ул. 40 лет Победы, 39, tatyanka-bogdanovich@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-9677-9891

Евгения Анатольевна Чернуцкая, кандидат сельскохозяйственных наук, младший научный сотрудник, Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, 350901 Россия, Краснодар, ул. 40 лет Победы, 39, ev.belenko95@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-5140-9891

Галина Владимировна Таловина, 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, g.talovina@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0001-6167-1455

Information about the authors

Elena V. Ulyanovskaya, Dr. Sci. (Agriculture), Head of a Laboratory, North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, 39 40 let Pobedy St., Krasnodar 350901, Russia, ulyanovskaya_e@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3987-7363

Tatyana V. Bogdanovich, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, 39 40 let Pobedy St., Krasnodar 350901, Russia, tatyanka-bogdanovich@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-9677-9891

Evgenia A. Chernutskaya, Cand. Sci. (Agriculture), Associate Researcher, North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, 39 40 let Pobedy St., Krasnodar 350901, Russia, ev.belenko95@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-5140-9891

Galina V. Talovina, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, g.talovina@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0001-6167-1455

Вклад авторов: все авторы участвовали в проведении исследования. Ульяновская Е. В., Таловина Г. В. подготовили текст статьи.
Contribution of the authors: all authors participated in the research. E. V. Ulyanovskaya and G. V. Talovina prepared the text of the publication.

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

Статья поступила в редакцию 27.06.2025; одобрена после рецензирования 15.10.2025; принята к публикации 09.12.2025.
The article was submitted on 27.06.2025; approved after reviewing on 15.10.2025; accepted for publication on 09.12.2025.

ОБЗОРЫ

Обзорная статья
УДК 635.41:632.35:632.25
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o13

CC BY

Альтернариоз и сосудистый бактериоз у *Brassica rapa* L.: механизмы устойчивости, селекционные решения и перспективы

Г. С. Огудин, А. М. Артемьева

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

Автор, ответственный за переписку: Григорий Сергеевич Огудин, gregory.oogudin@gmail.com

В обзоре представлен анализ современных исследований, посвященных изучению устойчивости культур *Brassica rapa* L. к наиболее опасным патогенам – грибам рода *Alternaria* и бактерии *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*. Проанализированы географическое распространение, вредоносность и расовый состав популяций возбудителей, выявлены региональные особенности их распределения. Особое внимание уделено изучению биохимических механизмов устойчивости растений, включая роль вторичных метаболитов (глюкозинолатов, фенольных соединений, фитоалексинов) и активность ключевых защитных ферментов. Рассмотрены современные подходы к селекции на устойчивость, включая использование представителей родственных родов и маркер-вспомогательной селекции. Показано, что интеграция традиционных и молекулярно-генетических методов является перспективным направлением для создания сортов с комплексной устойчивостью, адаптированных к современным фитопатологическим вызовам в условиях глобального изменения климата.

Ключевые слова: овощные и масличные культуры *Brassica rapa*, *Alternaria* spp., *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*, селекция на устойчивость

Благодарности: статья подготовлена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту № FGEM-2022-0003 «Мировые ресурсы овощных и бахчевых культур коллекции ВИР: эффективные пути раскрытия эколого-генетических закономерностей формирования разнообразия и использования селекционного потенциала».

Для цитирования: Огудин Г.С., Артемьева А.М. Альтернариоз и сосудистый бактериоз у *Brassica rapa* L.: механизмы устойчивости, селекционные решения и перспективы. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026; 187(1):252-261. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o13

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

© Огудин Г.С., Артемьева А.М., 2026

SURVEYS

Review article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o13

Alternaria leaf spot and black rot in *Brassica rapa* L.: resistance mechanisms, breeding solutions and prospects

Grigory S. Ogudin, Anna M. Artemyeva

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

Corresponding author: Grigory S. Ogudin, gregory.oogudin@gmail.com

The review presents an analysis of recent studies on the resistance of *Brassica rapa* L. crops to the most dangerous pathogens – fungi of the genus *Alternaria*, and the bacteria *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*. Geographic distribution, virulence, and racial composition of pathogen populations were analyzed, and regional features of their distribution were identified. Particular attention was paid to the research into the biochemical mechanisms of plant resistance, including the role of secondary metabolites (glucosinolates, phenolic compounds, and phytoalexins), and the activity of the key defense enzymes. Modern approaches to breeding for resistance were considered, including the use of representatives of relative genera, and marker-assisted selection. It is shown that the integration of traditional and molecular genetics methods is a promising trend for the development of cultivars with complex resistance, adapted to modern phytopathological challenges in the context of global climate change.

Keywords: vegetable and oil *Brassica rapa* crops, *Alternaria* spp., *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*, breeding for resistance

Acknowledgments: the review was prepared within the framework of the state task according to the theme plan of VIR, Project No. FGEM-2022-0003 “Global genetic resources of vegetable and cucurbit crops in the VIR collection: effective ways to disclose ecogenetic patterns in the formation of their diversity and utilization of breeding potential”.

For citation: Ogudin G.S., Artemyeva A.M. *Alternaria* leaf spot and black rot in *Brassica rapa* L.: resistance mechanisms, breeding solutions and prospects. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(1):252-261. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o13

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal’s opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Репа *Brassica rapa* L. – один из наиболее полиморфных и экономически значимых видов в семействе Капустные (Brassicaceae Burnett). Длительный процесс внутривидового отбора, направленный на закрепление специфических морфологических, физиологических и биохимических признаков в различных эколого-географических зонах, привел к формированию уникального комплекса сельскохозяйственных культур, включающих овощные листовые, корнеплодные и масличные формы, которые составляют основу продовольственных систем целых регионов мира.

Экономическое значение вида определяется не только объемом производства и разнообразием сельскохозяйственной продукции, но и ее высокой пищевой ценностью. Низкая калорийность, обусловленная минимальным содержанием жиров, высокое содержание макро- и микроэлементов, среди которых калий, кальций, сера, фосфор, цинк, железо и марганец, делают овощные и масличные культуры вида (пекинская капуста, китайская капуста, розеточная капуста, японская капуста, репа, сурепица, тория, сарсон) ценным компонентом диетического питания. Листовые формы накапливают от 40 до 80 мг/100 г аскорбиновой кислоты (витамин С), 2–10 мг/100 г β-каротина и 50–200 мг/100 г хлорофиллов. Важной особенностью является наличие широкого спектра фенольных соединений и в краснокрашенных формах – антоцианов, которым присуща выраженная антиоксидантная и противовоспалительная активность, что способствует формированию иммунного ответа организма человека и снижению риска развития многих заболеваний (Artem'eva, Solov'eva, 2010; Aminul Islam et al., 2021; Soldatenko et al., 2022).

В то же время культуры вида *B. rapa* подвержены воздействию широкого спектра фитопатогенов. Болезни наносят значительный экономический ущерб, приводят к снижению урожайности, товарного качества продукции, как листьев, так и масла, и увеличению затрат на защитные мероприятия при выращивании растений и хранении продукции, при этом вторичные потери могут достигать 30–50% от собранного урожая, нанося удар по логистическим цепочкам и экономическому планированию (Meena et al., 2019).

Особую опасность в настоящее время представляют бактерии рода *Xanthomonas* Dowson и грибы рода *Alternaria* Nees. В районах возделывания культур вида *B. rapa* фиксируется ежегодный рост развития данных патогенов, что приводит к устойчивой тенденции увеличения частоты возникновения и интенсивности развития вызываемых ими заболеваний (Nowakowska et al., 2019; Runno-Paurson et al., 2021).

Повышение среднегодовых температур во многих регионах умеренного климата, увеличение продолжительности теплых периодов, смещение сезонности осадков и повышенная влажность воздуха создают благоприятные условия для распространения фитопатогенов, способствуя их эволюции, увеличению вирулентности, формированию резистентности (Blagojević et al., 2020). Это приводит к появлению высокоадаптивных, агрессивных и устойчивых к пестицидам популяций. Параллельное повышение частоты экстремальных погодных явлений, вызывающих абиотические стрессы, делает растения более восприимчивыми к инфекции, нарушая физиологические процессы и угнетая работу иммунной системы.

В результате традиционные системы защиты растений становятся малоэффективными. Эпифитотии приобретают более ранний, интенсивный и географически широкий характер, выводя селекцию сортов сельскохозяйственных культур с комплексной устойчивостью к патогенам и способностью синтезировать широкий спектр биологически активных веществ на первый план стратегии защиты растений.

Цель настоящей работы: обобщить имеющиеся литературные данные о распространенности, вредоносности патогенов родов *Xanthomonas* и *Alternaria* и оценить вклад биологически активных веществ растений вида *Brassica rapa* в формировании устойчивости к ним.

Альтернариоз: современное состояние проблемы

У капустных (крестоцветных) культур описано более 20 видов и форм гифомицетов, которые относятся к роду *Alternaria*. Широко распространены альтернариозы важнейших культур рода *Brassica* L.: всех разновидностей капусты огородной *Brassica oleracea* L., листовых, корнеплодных, масличных подвидов репы *B. rapa* L., рапса *B. napus* L., горчицы *B. juncea* Czern. и др., вызываемые *Alternaria brassicae* (Berk.) Sacc., *Alternaria brassicicola* (Schwein.) Wiltshire и *Alternaria japonica* Yoshii, а на растениях рода *Raphanus* L. – еще *Alternaria raphani* J.W. Groves & Skolko (Li et al., 2023).

В настоящее время альтернариоз (*Alternaria* spp.) распространен повсеместно в мире, где присутствуют благоприятные для него условия: высокое увлажнение и прохладный умеренный климат, – в странах Европы, США, Канаде, России. Все чаще встречаются упоминания о распространении болезни в Южной Азии (Индия и Бангладеш). *A. brassicae* обнаружен почти на всей территории европейской части России (в том числе на северо-западе) и Дальнем Востоке, в прибалтийских государствах, странах Западной Европы, США, Канаде, Китае и Казахстане, а также в Бразилии, Аргентине, Чили и Японии. Вид *A. brassicicola* обнаружен в Центральной России, на Северном Кавказе и на юге Дальнего Востока (Хабаровский и Приморский края), Республике Адыгее. В Северо-Западном федеральном округе фиксируются очаги поражения. Активное распространение патогена наблюдается на севере США и Европы (Великобритания). Встречаются сообщения о распространении в странах Африки (ЮАР) и Океании (Австралия и Новая Зеландия). Ареал *A. japonica* охватывает большую часть Восточной Азии (Gannibal, 2011; Nowicki et al., 2012; Nishikawa, Nakashima, 2020; Gannibal, Orina, 2022; Narain et al., 2022).

Основным фактором, лимитирующим распространение видов *Alternaria*, является температура. Особенно велико влияние этого фактора в период высокой влажности (росы), когда начинают прорастать конидии и происходит инфицирование растений. Наименее требовательным к внешним условиям является *A. brassicae*, для прорастания конидий и спороношения которого необходима температура 18–24°С. *A. brassicicola* – более теплюбивый вид, которому необходима температура 20–30°С. В связи с постепенным потеплением климата, он активно расширяет свой ареал обитания. *A. japonica* обладает умеренными температурными требованиями – 20–25°С (Nowicki et al., 2012).

Следует отметить, что *A. brassicicola* – более агрессивный вид, способный производить большое количество конидий и быстрее поражать ткани растения, в то время как *A. brassicae* – повсеместно распространенный пато-

ген, особо доминирующий на рапсе и горчице (Meena et al., 2010; Nowicki et al., 2012; Blagojević et al., 2020**)**.

Виды рода *Alternaria* обладают высокой агрессивностью и вредоносностью, которые проявляются на всех стадиях развития растения и имеют системный многоуровневый деструктивный характер. Они вызывают появление пятен на листьях крестоцветных. Симптомы начинают проявляться на более старых тканях растения, начиная с маленьких, округлых поражений, которые увеличиваются в размерах и сливаются, формируя обширные зоны некроза с характерной зональностью (концентрические кольца) и выраженным хлорозом по периферии. Центры могут отмирать и выпадать, в результате чего листья имеют изрешеченный вид или, при благоприятных условиях, покрываются сажистым налетом спороношения гриба. Пятна, вызываемые видом *A. brassicae*, обычно крупные, достигают нескольких сантиметров и имеют ярко выраженные концентрические кольца. Для них также характерна обширная желтая кайма. В отличие от него, *A. brassicicola* образует многочисленные, но более мелкие пятна размером 2–5 мм, которые часто сливаются. Эти пятна угловатые или округлые, угольно-черного цвета и без ярко выраженного желтого гало (Saharan et al., 2016; Narain et al., 2022).

В результате резко сокращается фотосинтетическая и ассимиляционная поверхности листьев, нарушаются физиологические процессы, растение угнетается и погибает. Пораженная сельскохозяйственная продукция становится непригодна для употребления вследствие загрязнения метаболитами гриба, которые являются микотоксинами, теряются ее полезные свойства. Данные виды фитопатогенных грибов заражают и сеянцы: симптомы при этом проявляются в виде черных полос на семядолях и гипокотиле, что может приводить к гибели. В процессе семеноводства поражаются стручки, что отрицательно сказывается на качестве семян (Gannibal, 2011; Saharan et al., 2016; Munir et al., 2020).

В современных публикациях констатируется, что подавляющее большинство коммерческих сортов пекинской, китайской, японской капусты, репы и сурепицы вида *B. rapa* являются высоко- или умеренно восприимчивыми к патогенам *A. brassicae* и *A. brassicicola*, но внутри вида существует значительное генетическое разнообразие по признаку устойчивости. Путем масштабного скрининга генетического разнообразия идентифицированы отдельные генотипы, проявляющие толерантность или частичную устойчивость. Обнаружены перспективные источники устойчивости среди индийских линий масличной тории (*Brassica rapa* subsp. *dichotoma* Roxb.) и местных популяций и примитивных форм корнеплодной репы (*B. rapa* subsp. *rapa*) из Восточной Азии, при этом особую роль в селекции на устойчивость исследователи отводят классическим методам отбора и гибридизации с использованием устойчивых образцов (Chatta et al., 2022).

В работах подтверждается наличие источников толерантности и частичной устойчивости к альтернариозу в генофонде родственных видов: горчица белая *Sinapis alba* L., рыжик *Camelina sativa* (L.) Crantz, индау (эрука) *Eruca sativa* Mill. и редька полевая *Raphanus raphanistrum* L. Они идентифицированы как перспективные источники устойчивости (Maxwell, Scott, 2008; Gupta et al., 2014; Dixit et al., 2020; Singh S. et al., 2024).

Значительный интерес для селекции представляет генофонд вида *Brassica napus.* Многочисленные исследования были направлены на скрининг обширных коллекций генетических ресурсов растений и идентификацию генотипов, проявляющих толерантность или частичную устойчивость к возбудителям альтернариоза. Исследования не только позволили выделить перспективные линии для использования в селекционных программах, но и заложили основу для изучения генетических и физиолого-биохимических механизмов, детерминирующих устойчивость (Sharma et al., 2007; Nowicki et al., 2012). Поскольку *B. napus* (геном AACC) произошел от скрещивания *B. rapa* (AA) и *B. oleracea* (CC), он служит видом-посредником для переноса генов устойчивости как от самого рапса, так и от капусты огородной (*B. oleracea*) к *B. rapa*. Межвидовая гибридизация *B. rapa* с устойчивыми линиями *B. napus* является одним из наиболее возможных подходов к реализации селекционных программ по устойчивости (Panjabi et al., 2019).

Перспективным направлением исследований является комплексная оценка генетических ресурсов *B. rapa*, направленная на выявление устойчивых генотипов и на сравнительный анализ эффективности методов оценки (естественный и искусственный инфекционный фон). Установлено, что естественный инфекционный фон лучше отражает горизонтальную устойчивость, складывающуюся из множества механизмов, что является окончательным критерием для отбора. Искусственный фон позволяет стандартизировано оценить специфические механизмы устойчивости (вертикальная устойчивость) к конкретному патогену, исключив влияние переменных факторов среды в рамках массового скрининга (Chen L. et al., 2003; Dixon, Wells, 2024).

Устойчивость растений к патогенам часто является результатом координированной работы многоуровневой системы защиты, где ключевая роль отводится вторичным метаболитам. Современные методы аналитической химии, в частности, хроматография в сочетании с масс-спектрометрией, позволили исследователям провести детальный сравнительный анализ метаболомных профилей инфицированных и здоровых тканей у контрастных по устойчивости к патогенам генотипов. Были установлены ключевые метаболиты, повышающие устойчивость, среди которых основные – индольные глюкозинолаты. Концентрация специфических глюкозинолатов (например, глюкобрассицина) и продуктов их распада (таких как индол-3-карбинол) была значительно повышена у устойчивых генотипов. Эти соединения известны своей сильной антифунгальной (противогрибковой) активностью. Оценена высокая роль фитоалексинов – зафиксировано накопление брассилексинов (специфические для капустных растений антимикробные соединения), синтезируемых в ответ на проникновение патогена (Baek et al., 2016; Yadav P. et al., 2020; Kim S. et al., 2023; Yan et al., 2024).

Устойчивость *Sinapis alba* также связывают со способностью синтезировать уникальные фитоалексины, которые эффективно ингибируют прорастание конидий и рост мицелия *Alternaria* (Pedras, Zaharia, 2000; Ahmed et al., 2024). У *Camelina sativa* глюкозинолатный профиль существенно отличается от профиля других капустных культур: основу профиля рыжика составляют индольные соединения, с чем связывают его высокую толерантность к альтернариозу (Glawischnig, 2007). Экстракты из *Eruca sativa* показали значительную фунгитоксическую активность против *Alternaria brassicicola*, что подтверждает роль вторичных метаболитов в защите (Gupta et al., 2013, 2014). *Raphanus raphanistrum*, содержащий глюкорафанин, идентифицирован как вид, включающий

источники устойчивости, и рекомендован для использования в межвидовых селекционных программах (Adhikari et al., 2023).

При заражении *Alternaria brassicicola* в листьях *Eruca sativa* значительно повышалась активность ключевых защитных ферментов, таких как пероксидаза (PO) и фенилаланин-аммиак-лиаза (PAL). Пероксидаза катализирует сшивание молекул лигнина, формируя прочный полимерный барьер вокруг места инфекции. Растение не просто пассивно сопротивляется, а активно перестраивает свой метаболизм, чтобы структурно изолировать патоген (лигнификация) и создать неблагоприятную для него химическую среду путем синтеза фенолов и флавоноидов (Gupta et al., 2014).

Ряд исследований связывает наблюдаемую устойчивость отдельных генотипов *Brassica rapa* к *Alternaria brassicae* и *A. brassicicola* с конкретными молекулярными и биохимическими механизмами защиты и выявляет общий биохимический профиль, ассоциированный с устойчивостью. Была установлена статистически значимая отрицательная корреляция между степенью поражения тканей *A. brassicicola* и концентрацией общих фенолов и флавоноидов, а также активностью ферментов PAL и пероксидазы. Идентификация ключевой роли PAL свидетельствует о том, что гены, кодирующие этот фермент, а также гены, регулирующие его активность, представляют первоочередной интерес для маркер-вспомогательной селекции (MAS) (Zaynab et al., 2019; Huang, Dudareva, 2023).

Критически важным является анализ ранних этапов взаимодействия растения и патогена. Установлено, что ключевое различие между устойчивыми и восприимчивыми генотипами заключается не только в наличии ответа, но и в скорости и интенсивности его появления. Проводились исследования содержания биологически активных соединений растений в динамике. У устойчивых генотипов наблюдался пик активности ферментов (сверхоксиддисмутазы и полифенолоксидазы) и накопления низкомолекулярных защитных соединений (фенолов) в первые 24–72 часа после инокуляции (Zaynab et al., 2019; Mittler et al., 2022).

Таким образом, инновационная стратегия селекции культур *Brassica rapa*, направленная на устойчивость к альтернариозу, базируется на эффективной интеграции традиционных подходов с современными биотехнологическими решениями. Перспективным направлением является комплексное использование генетического разнообразия представителей родственных родов, обладающих ценными механизмами иммунитета, и маркер-вспомогательной селекции на основе содержания выявленных биохимических показателей устойчивости – индольных глюкозинолатов, фитоалексинов и ферментов антиоксидантной системы. Такой комплексный подход открывает новые возможности для преодоления современных фитопатологических вызовов.

Сосудистый бактериоз: состояние проблемы

Род фитопатогенных грамотрицательных бактерий *Xanthomonas* является одним из самых вредоносных возбудителей болезней растений, поражая широкий спектр сельскохозяйственных культур. В настоящее время инфицирование данными бактериями отмечено на 392 видах растений, среди которых 124 вида относятся к однодольным, включая такие критически важные злаки, как пшеница, рожь, овес, ячмень, и 268 видов относятся к двудольным, в число которых входят ключевые продовольственные культуры: капуста, томат, огурец, а также бобовые (Brenner et al., 2005).

Сосудистый бактериоз поражает растение на всех этапах его развития. Симптомы на всходах проявляются в виде водянистых бурых пятен на семядольных листьях, с последующей некротизацией проводящих сосудов и гибелью всходов. Возбудитель *X. campestris* pv. *campestris* (Xcc) отличается высокой скоростью распространения: от единичного очага до массового заражения проходит всего несколько недель. У взрослых растений заболевание проявляется в виде характерных V-образных хлоротичных пятен по краям листовой пластины, которые впоследствии переходят в некрозы. Пораженные листья желтеют и отмирают, на поперечном срезе черешка отчетливо видно потемнение сосудов. Проникая в проводящую систему через гидатоды или механические повреждения, патоген выделяет полисахарид ксантан, который блокирует ее работу, что нарушает физиологические процессы и приводит к снижению ростовых процессов, а при системном поражении – к гибели растения. Этот густой, вязкий полимер, который бактерии активно выделяют в сосуды ксилемы, обладает и защитной функцией: его вязкая структура затрудняет проникновение в очаг инфекции защитных веществ – фитоалексинов, препятствует действию препаратов. В период хранения инфекция в десятки раз усиливает развитие бактериальной мокрой гнили. В итоге товарная урожайность может снизиться на 50–80%, а потери при хранении резко возрастают, нанося значительный экономический ущерб (Vicente, Holub, 2013; Ignatov, 2014).

Сосудистый бактериоз был впервые обнаружен в 1890 г. в США (штат Висконсин). Первое описание болезни сделано Гарманом в 1894 г. в штате Кентукки. Со временем сосудистый бактериоз признали одним из самых серьезных и вредоносных заболеваний крестоцветных культур в странах с теплым и влажным климатом. Наибольшую экономическую угрозу он представляет в регионах с интенсивным овощеводством – в странах Европы, Северной Америки, Азии (Vicente, Holub, 2013). В России сосудистый бактериоз впервые обнаружили в 1905 г. на территории Смоленской и Харьковской губерний, затем в Московской и Петербургской губерниях, и в дальнейшем во всех регионах, где культивируют крестоцветные культуры. В настоящее время он представляет серьезную опасность на юге европейской части России (Краснодарский край, Ростовская обл., Северный Кавказ), в Центрально-Черноземном регионе и Поволжье. В связи с изменением климата он продвигается в более северные регионы страны, включая Северо-Западный. Значимым фактором расширения ареала инфекции является недостаточный контроль за зараженностью семян, которые являются одним из основных источников ее распространения. Эпифитотия может быть вызвана даже единичной партией инфицированного посевного материала, попавшей в благоприятную среду (Izrailsky, 1979; Fargier, Manceau, 2007; Lazarev et al., 2017).

Существует 11 рас возбудителя *X. campestris* pv. *campestris*. Несмотря на глобальный характер проблемы сосудистого бактериоза, фитопатологическая обстановка и расовый состав популяции бактерии могут существенно различаться в разных географических регионах. По мнению многих исследователей, 1-я, 3-я, 4-я расы наиболее распространены, обладают широким спектром вирулентности и способны преодолевать большинство основных генов устойчивости, которые были введены

в культивируемые сорта. Большие опасения вызывает 6-я раса, способная преодолевать действие нескольких ключевых генов устойчивости (таких как *R1* и *R4*), широко используемых в селекции (Lema et al., 2012; Cruz et al., 2017; Afrin et al., 2020).

Для Западной Европы особую опасность представляют 1-я, 4-я и 6-я расы. В Южной Европе широко распространена 4-я раса, вызывающая серьезные эпифитотии (Lema et al., 2012; Cruz et al., 2017; Pineda, Barón 2023). В Южной Америке существует большое генетическое и вирулентное разнообразие популяции Xcc. Доминирующими расами являются Xcc1 и Xcc4. Отмечена высокая агрессивность Xcc6. В Бразилии были идентифицированы расы 1, 3, 4, 5 и 6. Раса 4 была доминирующей и наиболее широко распространенной на всей территории страны. Штаммы расы 4 также проявили наибольшую агрессивность по сравнению с другими выявленными расами (Batista et al., 2021). Выявлено значительное генетическое разнообразие популяции Xcc в Индии, что свидетельствует о длительной истории адаптации и эволюции патогена в регионе. Расовый анализ подтвердил доминирование Xcc1 и Xcc4 (Singh S. et al., 2018; Singh D. et al., 2022).

В Восточной Азии выявлено 9 различных рас Xcc, что указывает на исключительно высокое расовое разнообразие патогена, особенно в Китае. Исследования показали, что китайские штаммы генетически отличаются от некоторых международных изолятов, что говорит о возможной географической изоляции и независимой эволюции. Раса 1 была наиболее распространенной, за ней следовали расы 4 и 6. В Корее изучали текущий расовый состав и его изменение на популяциях пекинской капусты (*Brassica rapa* subsp. *pekinensis* (Lour.) Hanelt). Выявлено, что раса 4 является наиболее распространенной. Особое внимание уделено идентификации 9-й расы, в дальнейшем увеличению ее частоты и способности вызывать тяжелые симптомы на культивируемых сортах, считавшихся уже относительно устойчивыми, что говорит о способности преодолевать существующую устойчивость (Chen D. et al., 2022; Hong et al., 2024). Изучался релевантный расовый состав в Японии. Подтверждено, что расы 1, 4 и 3 являются наиболее распространенными. Установлено, что раса 3 становится все более агрессивной и способна преодолевать устойчивость, контролируемую геном *R1*, что вызывает опасения, так как многие коммерческие сорта уязвимы к ней. Вызывает опасения и 7-я раса (Kim Y. et al., 2023).

Исследования, проведенные в США, демонстрируют специфическую структуру патогена, обусловленную местными агроэкологическими условиями и используемым сортовым материалом. Установлено, что расы 1, 3, 4, 6 независимо эволюционировали в пределах страны. Раса 4 остается доминирующей, далее следуют расы 1 и 6. Анализ данных выявил выраженную сезонную динамику в распределении рас. Доминирующая раса 1 сменяется расой 4: первая демонстрирует пик встречаемости в период с апреля по июнь, тогда как вторая доминирует с июля по октябрь. (Lange et al., 2016; Cruz et al., 2017).

В России провели масштабный сбор изолятов патогена из различных регионов страны и впервые применили комплекс современных молекулярных методов для их точной расовой идентификации. Использовался ПЦР-анализ со специфичными праймерами, позволяющий дифференцировать расы на основе наличия генов патогенности. Установлено, что доминирующей расой на территории России является раса 4. Также, с чуть меньшей частотой, была выявлена раса 1, а затем и раса 6. Подтверждено, что сосудистый бактериоз имеет повсеместное распространение в европейской части России и на Дальнем Востоке, а также очаговое – в Сибири и на Урале. Определены зоны особой вредоносности – Центральный регион, Северо-Западный регион (Ленинградская область) и Дальний Восток (Приморский край) (Ignatov, 2014; Lazarev et al., 2017).

Таким образом, наблюдается общая глобальная тенденция к увеличению расового разнообразия патогена и появлению более агрессивных рас, способных преодолевать существующую устойчивость сортов, что представляет серьезную угрозу для производства капустных культур во всем мире.

Эффективная борьба с этим патогеном требует глубокого понимания его генетического разнообразия и эволюции. Исследователи применяли метод многолокусного секвенирования (MLST) для изучения возбудителя и доказали, что, определив генетическую структуру штамма, можно с высокой долей вероятности прогнозировать его вирулентность. С помощью полногеномного анализа выявлена четкая региональная дифференциация популяций патогена и обнаружены текущие процессы адаптивной эволюции. Показано, что различные генетические линии Xcc демонстрируют специфические профили вирулентности, а рекомбинация и горизонтальный перенос генов играют ключевую роль в появлении новых вирулентных рас (Lema et al., 2012; Chen D. et al., 2022).

У линий удвоенных гаплоидов картирующих популяций *B. rapa* выявили устойчивость к четырем расам возбудителя сосудистого бактериоза, которая наследуется по моногенному типу. С помощью QTL-анализа в геноме идентифицированы хромосомные локусы, контролирующие устойчивость. Для наиболее значимых локусов подобраны тесно сцепленные с ними молекулярные SSR-маркеры. Полученные данные и выделенные линии представляют прямую практическую ценность для ускоренной селекции (Artemyeva et al., 2018).

Проведенный скрининг 52 образцов *B. rapa* позволил выявить 19 высокоустойчивых форм, что значительно расширяет ресурсную базу для селекции. Генетический анализ на примере скрещивания устойчивой линии Е5 и восприимчивой линии Е4 показал, что устойчивость контролируется одной парой аддитивно-доминантных основных генов с высокой наследуемостью (93,43%). Цитологические исследования выявили ключевой клеточный механизм: устойчивость у Е5 связана с активной аутофагией в клетках паренхимы ксилемы, ограничивающей распространение патогена, в то время как у восприимчивой Е4 наблюдался некроз клеток. Исследование устанавливает связь между генетической природой устойчивости и конкретным клеточным механизмом защиты (Deng et al., 2025).

Экспериментальные данные подтверждают, что определенные гены ключевого метаболического пути могут специфически подавлять иммунный ответ растений, вероятно, нарушая баланс в синтезе защитных соединений. Так, сверхэкспрессия гена *Bol4CL41* у генетически модифицированных растений *B. rapa* увеличивала площадь поражения тканей после инокуляции патогеном (Ma et al., 2025).

Ключевым аспектом современной селекции является как идентификация фенотипически устойчивых генотипов, так и изучение физиолого-биохимических механизмов их устойчивости. Современные исследования концентрируются на изучении комплекса защитных реак-

ций, включающих синтез низкомолекулярных фитоантиципинов и модуляцию профилей вторичных метаболитов. Особый интерес представляет комплексный метаболомный анализ, позволяющий получить системное представление о перестройке метаболических путей при патогенезе. Исследования контрастных по устойчивости образцов показывают следующее. Индольные глюкозинолаты демонстрируют значительную дифференциацию: концентрация глюкобрассицина у устойчивых форм превышает показатели восприимчивых в 3,2 раза; 4-гидроксиглюкобрассицин характеризуется активным накоплением в течение первых 24 часов после инфицирования, а неоглюкобрассицин обнаруживается исключительно в устойчивых линиях. Фенольные соединения проявляют выраженную отрицательную корреляцию с уровнем устойчивости: содержание синаповой кислоты сильно влияет на процесс инокуляции, сирингиновая кислота показывает увеличение концентрации в несколько раз через 48 часов после заражения, а кверцетин-3-глюкозид подтверждает свою значимость прямой антимикробной активностью *in vitro* против Xcc. Активность защитных ферментов существенно различается между контрастными по устойчивости генотипами: пероксидаза (POD) проявляет более высокую активность у устойчивых форм, полифенолоксидаза (PPO) достигает пика активности через 24 часа после инокуляции, а фенилаланин-аммиак-лиаза (PAL) демонстрирует многократную индукцию в ответ на заражение (Aires et al., 2011; Sotelo et al., 2015; Liu et al., 2021; Dai et al., 2025).

Протеомный анализ выявил молекулярный ответ *B. rapa* на инфицирование *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*. Из идентифицированных дифференциально экспрессируемых белков ключевую роль в формировании устойчивости играют два основных функциональных класса. Во-первых, наблюдается значительная активация прямого антимикробного ответа, о чем свидетельствует сверхэкспрессия связанных с патогенезом белков (PR), таких как хитиназа и β-1,3-глюканаза, направленных на разрушение клеточных стенок патогена. Во-вторых, выявлена активация белков теплового шока (HSP70, HSP90), что подчеркивает критическую важность поддержания протеостаза и стабилизации иммунных сигнальных комплексов в условиях биотического стресса. Полученные данные демонстрируют, что эффективная защита растения обеспечивается за счет синергии двух стратегий: прямого патоген-ориентированного иммунитета и механизмов внутриклеточного гомеостаза для обеспечения стабильной работы защитной системы (Ahmad et al., 2016; Tortosa et al., 2022; Yadav et al., 2023; Dai et al., 2025).

Таким образом, современные исследования демонстрируют, что эффективная устойчивость культур *Brassica rapa* к сосудистому бактериозу формируется благодаря синергетическому взаимодействию многоуровневой защиты. На биохимическом уровне ключевую роль играет активация специфических вторичных метаболитов, таких как индольные глюкозинолаты и фенольные соединения, которые проявляют прямую антимикробную активность. На протеомном уровне устойчивость обеспечивается за счет координированной экспрессии PR-белков, осуществляющих прямую атаку на патоген, и шаперонов, поддерживающих клеточный гомеостаз в условиях инфекционного стресса. Комплексное изучение этих механизмов раскрывает молекулярные основы устойчивости и предоставляет возможности для ускоренной селекции.

Заключение

Культуры вида *Brassica rapa* имеют большое экономическое значение во многих регионах мира. Проведенный анализ свидетельствует о критической важности разработки комплексных стратегий защиты данных культур от патогенов родов *Xanthomonas* и *Alternaria* в условиях глобальных климатических изменений. Установлено, что эффективная устойчивость формируется благодаря взаимодействию биохимических механизмов, включающих активацию специфических вторичных метаболитов и координированную экспрессию защитных белков. Перспективным направлением селекции является использование генетического разнообразия родственных родов в сочетании с маркер-вспомогательным отбором. Интеграция традиционных подходов с современными биотехнологическими решениями открывает возможности для создания нового поколения сортов, сочетающих устойчивость к патогенам с адаптацией к меняющимся условиям среды. Таким образом, комбинация генетических, биохимических и молекулярных методов представляет собой наиболее эффективный путь для преодоления современных фитопатологических вызовов в выращивании крестоцветных культур.

References / Литература

Adhikari K., Sharma C., Karki A., Magar I.B., Chand R., Magar S.G. Varietal screening of radish genotypes against Alternaria leaf spot (*Alternaria raphani*) at western Nepal. *Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technology*. 2023;11(4):639-643. DOI: 10.24925/turjaf.v11i4.639-643.5346

Afrin K.S., Rahim M.A., Rubel M.H., Park J.I., Jung H.J., Kim H.T. et al. Development of PCR-based molecular marker for detection of *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* Race 6, the causative agent of black rot of brassicas. *Plant Pathology Journal*. 2020;36(5):418-427. DOI: 10.5423/PPJ.OA.06.2020.0103

Ahmad P., Abdel Latef A.A.H., Rasool S., Akram N.A., Ashraf M., Gucel S. Role of proteomics in crop stress tolerance. *Frontiers in Plant Science*. 2016;7:1336. DOI: 10.3389/fpls.2016.01336

Ahmed R., Saikia P., Aryasree R., Bhorali P. Isolation and characterization of *Alternaria brassicicola* from Assam (India) and screening for resistance in *Sinapis alba*. *Tropical Plant Pathology*. 2024;49:850-863. DOI: 10.1007/s40858-024-00678-w

Aires A., Dias C.S.P., Carvalho R., Oliveira M.H., Monteiro A.A., Simões M.V. et al. Correlations between disease severity, glucosinolate profiles and total phenolics and *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* inoculation of different Brassicaceae. *Scientia Horticulturae*. 2011;129(3):503-510. DOI: 10.1016/j.scienta.2011.04.009

Aminul Islam A.K.M., Hossain M.A., Mominul Islam A.K.M. (eds). *Brassica* breeding and biotechnology. London: IntechOpen; 2021. DOI: 10.5772/intechopen.87490

Artem'eva A.M., Solov'eva A.E. Characteristic properties of biochemical composition of hybrids of leaf vegetable cultures of *Brassica rapa* L. *Agrarian Russia*. 2010;(3):17-20. [in Russian] (Артемьева А.М., Соловьева А.Е. Особенности биохимического состава гибридов листовых овощных культур вида *Brassica rapa* L. *Аграрная Россия*. 2010;(3):17-20). DOI: 10.30906/1999-5636-2010-3-17-19

Artemyeva A.M., Ignatov A.N., Volkova A.I., Kocherina N.V., Konopleva M.N., Chesnokov Yu.V. Physiological and genetic components of black rot resistance in double haploid lines of *Brassica rapa* L. *Agricultural Biology*. 2018;53(1):157-169. DOI: 10.15389/agrobiology.2018.1.157eng

Baek S.A., Jung Y.H., Lim S.H., Park S.U., Kim J.K. Metabolic profiling in Chinese cabbage (*Brassica rapa* L. subsp. *pekinensis*) cultivars reveals that glucosinolate content is correlated with carotenoid content. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2016;64(21):4426-4434. DOI: 10.1021/acs.jafc.6b01323

Batista J.N.G., Ferreira M.A.S.V., Quezado-Duval A.M. Molecular and phenotypic characterization of *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* causing black rot in *Brassica* crops in Brazil. *Tropical Plant Pathology*. 2021;46(6):684-701. DOI: 10.1007/s40858-021-00456-y

Blagojević J.D., Vukojević J.B., Ivanović Ž.S. Occurrence and characterization of *Alternaria* species associated with leaf spot disease in rapeseed in Serbia. *Plant Pathology*. 2020;69(5):883-900. DOI: 10.1111/ppa.13168

Brenner D.J., Krieg N.R., Staley J.T., Garrity G.M., Boone D.R., Vos P., Goodfellow M., Rainey F.A., Schleifer K.H. (eds). Bergey's manual of systematic bacteriology. Vol. 2: The proteobacteria. Part B: The gammaproteobacteria. 2nd ed. New York, NY: Springer; 2005. DOI: 10.1007/0-387-28022-7

Chatta M.B., Razzaq M.B., Shafique S., Siddique M. Isolation, characterization and management of *Alternaria* leaf blight of turnip through botanicals. *Pakistan Journal of Phytopathology*. 2022;34(2):221-233. DOI: 10.33866/phytopathol.034.02.0802

Chen D., Zhong X., Cui J., Li H., Han R., Yue X. et al. Comparative genomic analysis of *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* isolates BJSJQ20200612 and GSXT20191014 provides novel insights into their genetic variability and virulence. *Frontiers in Microbiology*. 2022;13:833318. DOI: 10.3389/fmicb.2022.833318

Chen L.Y., Price T.V., Park-Ng Z. Conidial dispersal by *Alternaria brassicicola* on Chinese cabbage (*Brassica pekinensis*) in the field and under simulated conditions. *Plant Pathology*. 2003;52(5):536-545. DOI: 10.1046/j.1365-3059.2003.00880.x

Cruz J., Tenreiro R., Cruz L. Assessment of diversity of *Xanthomonas campestris* pathovars affecting cruciferous plants in Portugal and disclosure of two novel *X. campestris* pv. *campestris* races. *Journal of Plant Pathology*. 2017;99(2):403-414.

Dai H., Hu L., Wang J., Yue Z., Wang J., Chen T. et al. Constructing a novel disease resistance mechanism model for cruciferous crops: an example from black rot. *Molecular Plant Pathology*. 2025;26(2):e70060. DOI: 10.1111/mpp.70060

Deng S., Kong C., Ma H., Ji J., Wang Y., Zhang Y. et al. Genetic and cellular basis of resistance to black rot caused by *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* in *Brassica rapa*. *Horticulturae*. 2025;11(6):626. DOI: 10.3390/horticulturae11060626

Dixit S., Jangid V.K., Grover A. Evaluation of physiological and molecular effect of variable virulence of *Alternaria brassicae* isolates in *Brassica juncea*, *Sinapis alba* and *Camelina sativa*. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2020;155:626-636. DOI: 10.1016/j.plaphy.2020.08.025

Dixon G.R., Wells R. Vegetable brassicas and related crucifers. 2nd ed. Wallingford: CABI; 2024. DOI: 10.1079/9781789249170.0000

Fargier E., Manceau C. Pathogenicity assays restrict the species *Xanthomonas campestris* into three pathovars and reveal nine races within *X. campestris* pv. *campestris*. *Plant Pathology*. 2007;56(5):805-818. DOI: 10.1111/j.1365-3059.2007.01648.x

Gannibal Ph.B. Monitoring of *Alternaria* diseases in crops and identification of fungi of the genus *Alternaria* (Monitoring alternariozov selskokhozyaystvennykh kultur i identifikatsiya gribov roda *Alternaria*). St. Petersburg: VIZR; 2011. [in Russian] (Ганнибал Ф.Б. Мониторинг альтернариозов сельскохозяйственных культур и идентификация грибов рода *Alternaria*. Санкт-Петербург: ВИЗР; 2011).

Gannibal Ph.B., Orina A.S. An electronic key for identification of *Alternaria* fungi common in Russia. *Mycology and Phytopathology*. 2022;56(6):431-440. [in Russian] (Ганнибал Ф.Б., Орина А.С. Электронный ключ для идентификации грибов рода *Alternaria*, распространенных в России. *Микология и фитопатология*. 2022;56(6):431-440). DOI: 10.31857/S0026364822060034

Glawischnig E. Camalexin. *Phytochemistry*. 2007;68(4):401-406. DOI: 10.1016/j.phytochem.2006.12.005

Gupta P., Ravi I., Sharma V. Induction of β-1,3-glucanase and chitinase activity in the defense response of *Eruca sativa* plants against the fungal pathogen *Alternaria brassicicola*. *Journal of Plant Interactions*. 2013;8(2):155-161. DOI: 10.1080/17429145.2012.679705

Gupta P., Ravi I., Sharma V. Regulation of defence response in *Eruca sativa* plants inoculated with *Alternaria brassicicola*. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*. 2014;47(12):1408-1414. DOI: 10.1080/03235408.2013.844469

Hong J., Kim H.J., Hossain M.R., Rubel M.H., Sahu N., Mao S. et al. Characterization and distribution of black rot disease causing pathogen – *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* races of the Jeju Island, South Korea. *Journal of Plant Pathology*. 2024;106(5):251-257. DOI: 10.1007/s42161-023-01549-0

Huang X.Q., Dudareva N. Plant specialized metabolism. *Current Biology*. 2023;33(11):R473-R478. DOI: 10.1016/j.cub.2023.01.057

Ignatov A.N. Occurrence of emerging bacterial plant pathogenesis in Russia. *Zashchita kartofelya = Potato Protection*. 2014;(2):53-57. [in Russian] (Игнатов А.Н. Распространение возбудителей опасных бактериозов растений в Российской Федерации. *Защита картофеля*. 2014;(2):53-57).

Izrailsky V.P. Bacterial diseases of plants (Bakterialnye bolezni rasteniy). Moscow: Kolos; 1979. [in Russian] (Израильский В.П. Бактериальные болезни растений. Москва: Колос; 1979).

Kim S.H., Lee G.A., Subramanian P., Hahn B.S. Quantification and diversity analyses of major glucosinolates in conserved Chinese cabbage (*Brassica rapa* L. ssp. *pekinensis*) germplasms. *Foods*. 2023;12(6):1243. DOI: 10.3390/foods12061243

Kim Y.H., Mao S., Sahu N., Somaddar U., Kim H.T., Watanabe M. et al. Molecular marker development for the rapid differentiation of black rot causing *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* race 7. *Plant Pathology Journal*. 2023;39(5):494-503. DOI: 10.5423/PPJ.OA.07.2023.0102

Lange H.W., Tancos M.A., Carlson M.O., Smart C.D. Diversity of *Xanthomonas campestris* isolates from symptomatic crucifers in New York State. *Phytopathology*. 2016;106(2):113-122. DOI: 10.1094/PHYTO-06-15-0134-R

Lazarev A.M., Mysnik E.N., Ignatov A.N. Area and harmfulness zones of black rot of cabbage. *Plant Protection News*. 2017;1(91):52-55. [in Russian] (Лазарев А.М., Мысник Е.Н., Игнатов А.Н. Ареал и зона вредоносности сосудистого бактериоза капусты. *Вестник защиты растений*. 2017;1(91):52-55).

Lema M., Cartea M.E., Sotelo T., Velasco P., Soengas P. Discrimination of *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* races among strains from northwestern Spain by *Brassica* spp. genotypes and rep-PCR. *European Journal of Plant Pathology*. 2012;133(1):159-169. DOI: 10.1007/s10658-011-9929-5

Li J.F., Jiang H.B., Jeewon R., Hongsanan S., Bhat D.J., Tang S.M. et al. *Alternaria*: update on species limits, evolution, multi-locus phylogeny, and classification. *Studies in Fungi*. 2023;8:1. DOI: 10.48130/SIF-2023-0001

Liu Z., Wang H., Xie J., Lv J., Zhang G., Hu L. et al. The roles of Cruciferae glucosinolates in disease and pest resistance. *Plants*. 2021;10(6):1097. DOI: 10.3390/plants10061097

Ma H., Deng S., Kong C., Zhang Y., Zhao T., Ji J. et al. Multi-time point transcriptome analysis and functional validation revealed *Bol4CL41* negatively regulates black rot resistance in cabbage. *International Journal of Molecular Sciences*. 2025;26(13):6179. DOI: 10.3390/ijms26136179

Maxwell A., Scott J.K. Pathogens on wild radish, *Raphanus raphanistrum* (Brassicaceae), in south-western Australia – implications for biological control. *Australasian Plant Pathology*. 2008;37(5):523-533. DOI: 10.1071/AP08040

Meena P.D., Awasthi R.P., Chattopadhyay C., Kolte S.J., Kumar A. *Alternaria* blight: A chronic disease in rapeseed-mustard. *Journal of Oilseed Brassica*. 2010;1(1):1-11.

Meena P.D., Mehta N., Saharan G.S. *Alternaria–Brassica* associations: research progress and prospects. *Agricultural Research Journal*. 2019;56(4):600-612. DOI: 10.5958/2395-146X.2019.00095.4

Mittler R., Zandalinas S.I., Fichman Y., Van Breusegem F. Reactive oxygen species signalling in plant stress responses. *Nature Reviews. Molecular Cell Biology*. 2022;23(10):663-679. DOI: 10.1038/s41580-022-00499-2

Munir S., Shahzad A.N., Qureshi M.K. Acuities into tolerance mechanisms via different bioassay during Brassicaceae – *Alternaria brassicicola* interaction and its impact on yield. *PLoS One*. 2020;15(12):e0242545. DOI: 10.1371/journal.pone.0242545

Narain U., Kushwaha A., Mishra P., Singh S.K., Gupta G.P. Disease diagnosis and parasitism of *Alternaria* species on brassicaceous vegetables, oleiferous crops, and ornamental plants. *Research Journal of Agricultural Sciences*. 2022;13(6):1692-1701.

Nishikawa J., Nakashima C. Japanese species of *Alternaria* and their species boundaries based on host range. *Fungal Systematics and Evolution*. 2020;5:197-281. DOI: 10.3114/fuse.2020.05.13

Nowakowska M., Wrzesińska M., Kamiński P., Szczechura W., Lichocka M., Tartanus M. et al. *Alternaria brassicicola* – Brassicaceae pathosystem: insights into the infection process and resistance mechanisms under optimized artificial bio-assay. *European Journal of Plant Pathology*. 2019;153(1):131-151. DOI: 10.1007/s10658-018-1548-y

Nowicki M., Nowakowska M., Niezgoda A., Kozik E.U. *Alternaria* black spot of crucifers: symptoms, importance of disease, and perspectives of resistance breeding. *Vegetable Crops Research Bulletin*. 2012;76:5-19. DOI: 10.2478/v10032-012-0001-6

Panjabi P., Yadava S.K., Kumar N., Bangkim R., Ramchiary N. Breeding *Brassica juncea* and *B. rapa* for sustainable oilseed production in the changing climate: progress and prospects. In: C. Kole (ed.). *Genomic Designing of Climate-Smart Oilseed Crops*. Cham: Springer; 2019. p.275-369. DOI: 10.1007/978-3-319-93536-2_6

Pedras M.S.C., Zaharia I.L. Sinalbins A and B, phytoalexins from *Sinapis alba*: elicitation, isolation, and synthesis. *Phytochemistry*. 2000;55(3):213-216. DOI: 10.1016/s0031-9422(00)00277-6

Pineda M., Barón M. Assessment of black rot in oilseed rape grown under climate change conditions using biochemical methods and computer vision. *Plants*. 2023;12(6):1322. DOI: 10.3390/plants12061322

Runno-Paurson E., Lääniste P., Nassar H., Hansen M., Eremeev V., Metspalu L. et al. *Alternaria* black spot (*Alternaria brassicae*) infection severity on cruciferous oilseed crops. *Applied Sciences*. 2021;11(18):8507. DOI: 10.3390/app11188507

Saharan G.S., Mehta N., Meena P.D. Alternaria disease of crucifers: biology, ecology and management. Singapore: Springer; 2016. DOI: 10.1007/978-981-10-0021-8

Sharma N., Rahman M.H., Strelkov S., Thiagarajah M., Bansal V.K., Kav N.N.V. Proteome-level changes in two *Brassica napus* lines exhibiting differential responses to the fungal pathogen *Alternaria brassicae*. *Plant Science*. 2007;172(1):95-110. DOI: 10.1016/j.plantsci.2006.07.016

Singh D., Kesharwani A.K., Singh K., Jaiswal S., Iquebal M.A., Geat N. et al. Whole-genome sequence resource of Indian race 4 of *Xanthomonas campestris* pv. *campestris*, the causal agent of black rot disease of *Brassica oleracea* var. *capitata*. *Plant Disease*. 2022;106(5):1502-1505. DOI: 10.1094/PDIS-10-21-2217-A

Singh S., Dey S.S., Bhatia R., Batley J., Rumar R. Molecular breeding for resistance to black rot [*Xanthomonas campestris* pv. *campestris* (Pammel) Dowson] in Brassicas: recent advances. *Euphytica*. 2018;214(10):196. DOI: 10.1007/s10681-018-2275-3

Singh S., Sagar S., Rao M., Saroha S., Garg P., Prasad L. Screening wild *Brassica* species against *Alternaria brassicicola* (Schw.) Wiltsh for breeding *Alternaria* leaf spot resistance in *Brassica* vegetables. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2024;71(6):2509-2525. DOI: 10.1007/s10722-023-01776-5

Soldatenko A.V., Ivanova M.I., Bondareva L.L., Tareeva M.M. Cruciferous leafy vegetables (Kapustnye zelennye ovoshchi). Moscow: Federal Scientific Vegetable Center; 2022. [in Russian] (Солдатенко А.В., Иванова М.И., Бондарева Л.Л., Тареева М.М. Капустные зеленные овощи. Москва: Федеральный научный центр овощеводства; 2022).

Sotelo T., Lema M., Soengas P., Cartea M.E., Velasco P. *In vitro* activity of glucosinolates and their degradation products against brassica-pathogenic bacteria and fungi. *Applied and Environmental Microbiology*. 2015;81(1):432-440. DOI: 10.1128/AEM.03142-14

Tortosa M., Velasco P., Rodríguez V.M., Cartea M.E. Changes in *Brassica oleracea* leaves infected with *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* by proteomics analysis. *Frontiers in Plant Science*. 2022;12:781984. DOI: 10.3389/fpls.2021.781984

Vicente J.G., Holub E.B. *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* (cause of black rot of crucifers) in the genomic era is still a worldwide threat to brassica crops. *Molecular Plant Pathology*. 2013;14(1):2-18. DOI: 10.1111/j.1364-3703.2012.00833.x

Yadav B.G., Aakanksha, Kumar R., Yadava S.K., Kumar A., Ramchiary N. Understanding the proteomes of plant development and stress responses in *Brassica* crops. *Journal of Proteome Research*. 2023;22(3):660-680. DOI: 10.1021/acs.jproteome.2c00684

Yadav P., Mir Z.A., Ali S., Papolu P.K., Grover A. A combined transcriptional, biochemical and histopathological study unravels the complexity of *Alternaria* resistance and

susceptibility in *Brassica* coenospecies. *Fungal Biology*. 2020;124(1):44-53. DOI: 10.1016/j.funbio.2019.11.002

Yan W., Wang C., Zhang H., Fan W., Liu X., Huang Z. et al. Transcriptome and metabolome analyses reveal response mechanisms to *Alternaria brassicicola*-induced black spot disease in diverse Chinese cabbage genotypes. *Horticulturae*. 2024;10(9):1001. DOI: 10.3390/horticulturae10091001

Zaynab M., Fatima M., Sharif Y., Zafar M.H., Ali H., Khan K.A. Role of primary metabolites in plant defense against pathogens. *Microbial Pathogenesis*. 2019;137:103728. DOI: 10.1016/j.micpath.2019.103728

Информация об авторах

Григорий Сергеевич Огудин, аспирант, лаборант-исследователь, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, gregory.oogudin@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-0364-5715

Анна Майевна Артемьева, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, и. о. заведующего отделом, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, akme11@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-6551-5203

Information about the authors

Grigory S. Ogudin, Postgraduate Student, Laboratory Research Assistant, N.I. Vavilov Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, gregory.oogudin@gmail.com, https://orcid.org/0009-0001-0364-5715

Anna M. Artemyeva, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Acting Head of a Department, N.I. Vavilov Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, akme11@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-6551-5203

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 27.11.2025; одобрена после рецензирования 01.01.2026; принята к публикации 28.01.2026.
The article was submitted on 27.11.2025; approved after reviewing on 01.01.2026; accepted for publication on 28.01.2026.

ОБЗОРЫ

Обзорная статья
УДК 631.523:633.16
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o12

CC BY

Аллельное разнообразие генов короткостебельности ячменя *HvGA20ox2*, *Sln1*, *HvBRI1* и *HvDep1* – интеграция литературных данных и результатов анализа пангенома *in silico*

И. В. Поротников, К. А. Лукина, О. Ю. Антонова, О. Н. Ковалева

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

Автор, ответственный за переписку: Ксения Андреевна Лукина, k.lukina@vir.nw.ru

Настоящий обзор посвящен анализу полиморфизма генов короткостебельности *HvGA20ox2*, *HvBRI1* и *HvDep1* культурного ячменя, а также перспективного в этом плане гена *Sln1*. Обобщены данные о механизме действия и роли в селекции их аллелей, как природных, так и индуцированных. С целью расширения сведений о полиморфизме генов *HvGA20ox2*, *Sln1*, *HvBRI1* и *HvDep1* в обзор интегрированы результаты анализа *in silico* их последовательностей в пангеноме культурного ячменя, включающего 53 генотипа. В результате выявлен спектр ранее неизвестных гаплотипов и мутаций, потенциально ассоциированных с признаком высоты растений. Для гена *HvGA20ox2* идентифицировано 10 гаплотипов промоторной области и 6 типов белка, включая известные аллели *sdw1.c*, *sdw1.d*, *sdw1.ins* и *sdw1.ZU9*, причем последние два дифференцированы на подтипы. Ген *Sln1* характеризовался высокой консервативностью кодирующей области (изменения обнаружены лишь у 3 генотипов) при значительном разнообразии промотора (13 гаплотипов). Для гена *HvBRI1* выявлен аллель короткостебельности *uzu1.a*, однако в целом для него характерен наименьший полиморфизм как промоторной, так и кодирующей области. Для гена *HvDep1* показана максимальная вариабельность промотора (81% образцов отличались от дикого типа) при высокой консервативности белка. Таким образом, полученные сведения расширяют возможности направленного использования выявленного генетического разнообразия для дальнейших фундаментальных и прикладных исследований в селекции ячменя.

Ключевые слова: *Hordeum vulgare* L., промотор, белок, полиморфизм, пангеном, гаплотипы

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 25-26-00341, https://rscf.ru/project/25-26-00341/).

Для цитирования: Поротников И.В., Лукина К.А., Антонова О.Ю., Ковалева О.Н. Аллельное разнообразие генов короткостебельности ячменя *HvGA20ox2*, *Sln1*, *HvBRI1* и *HvDep1* – интеграция литературных данных и результатов анализа пангенома *in silico*. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(1):262-276. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o12

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

© Поротников И.В., Лукина К.А., Антонова О.Ю., Ковалева О.Н., 2026

SURVEYS

Review article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o12

Allelic diversity of the barley semidwarfing genes *HvGA20ox2*, *Sln1*, *HvBRI1*, and *HvDep1*: integrating published data and results of the *in silico* pangenome analysis

Igor V. Porotnikov, Kseniia A. Lukina, Olga Yu. Antonova, Olga N. Kovaleva

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

Corresponding author: Kseniia A. Lukina, k.lukina@vir.nw.ru

This review is focused on analyzing the polymorphism of the dwarfing genes *HvGA20ox2*, *HvBRI1*, and *HvDep1* in cultivated barley, as well as the *Sln1* gene, which is promising in this regard. Data on the mechanism of action and the role of their natural and induced alleles in barley breeding are summarized. To expand our understanding of the polymorphism of *HvGA20ox2*, *Sln1*, *HvBRI1*, and *HvDep1*, this review integrates the results of the *in silico* analysis of their sequences in the cultivated barley pangenome, which includes 53 genotypes. This approach revealed a spectrum of previously uncharacterized haplotypes and mutations potentially associated with plant height. For *HvGA20ox2*, 10 promoter haplotypes and 6 protein types were identified, including the known alleles *sdw1*.c, *sdw1.d*, *sdw1.ins*, and *sdw1.ZU9*, with the latter two differentiated into subtypes. The *Sln1* gene was characterized by a highly conserved coding region (changes were detected in only three genotypes), whereas the promoter region exhibited considerable variability, with 13 haplotypes. For *HvBRI1*, the *uzu1.a* dwarfism allele was identified; however, this gene is characterized by the lowest polymorphism of both the promoter and coding regions. The highest promoter variability (81% of the accessions differed from the wild type) with highly conserved protein was demonstrated for *HvDep1*. Thus, these data expand opportunities for the targeted application of the identified genetic diversity in further fundamental and applied research in barley breeding.

Keywords: *Hordeum vulgare* L., promoter, protein, polymorphism, pangenome, haplotypes

Acknowledgments: the study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (No. 25-26-00341, https://rscf.ru/project/25-26-00341/).

For citation: Porotnikov I.V., Lukina K.A., Antonova O.Yu., Kovaleva O.N. Allelic diversity of the barley semidwarfing genes *HvGA20ox2*, *Sln1*, *HvBRI1*, and *HvDep1*: integrating published data and results of the *in silico* pangenome analysis. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(1):262-276. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-o12

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Ячмень (*Hordeum vulgare* L.) – важная продовольственная, кормовая и пивоваренная культура, отличающаяся хорошей адаптивностью к различным условиям выращивания. Однако недостаточная прочность соломины приводит к полеганию даже в благоприятные для роста и развития годы, что ограничивает потенциальную урожайность ячменя. Полегание влияет на качество зерна из-за развития болезней, прорастания на корню, затрудняет механизированную уборку и снижает общую урожайность растений. Потери урожая при полегании могут составлять от 10 до 50%. Поэтому особое значение в современных селекционных программах уделяется устойчивости к полеганию (Kovrigina, Zaushintsena, 2010).

Решение проблемы устойчивости ячменя к полеганию селекционными методами связывают, прежде всего, с уменьшением высоты растений. Использование мутаций в генах, контролирующих высоту растений, дало возможность создавать короткостебельные сорта, что позволило в 50–60-х гг. XX в. существенно увеличить урожайность для таких зерновых культур, как пшеница, рис и ячмень (Hedden, 2003). Для ячменя идентифицировано более 30 генов и локусов, ассоциированных с карликовостью (высота растений менее 40 см) и полукарликовостью (от 41 до 80 см), в том числе *brachytic* (*brh*), *semi-brachytic* (*uzu*), *slender 1* (*sln1*), *breviaristatum* (*ari*), *erectoides* (*ert*), *semi-dwarf* (*sdw*), *slender dwarf* (*sld*) и *dense spike* (*dsp*) (Dockter, Hansson, 2015; Xu et al., 2017). Однако лишь немногие из этих генов используются в селекции ячменя из-за их негативного плейотропного эффекта (Kuczyńska et al., 2013). Наибольшее распространение в селекционных программах получили различные аллели короткостебельности генов *sdw1/denso* (*HvGA20ox2*), *uzu1* (*HvBRI1)* и *ari-e* (*HvDep1*). Перспективным источником для селекции может выступать ген *Sln1* – ортолог генов «зеленой революции» *Rht-B1* и *Rht-D1* мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) и *Slr1* риса (*Oryza sativa* L.) (Peng et al., 1999; Ikeda et al., 2001; Chandler et al., 2002; Fu et al., 2002).

С развитием технологии секвенирования следующего поколения стало возможным быстро и сравнительно дешево получать полногеномные сборки многих важных сельскохозяйственных культур. Важный результат – составление и получение пангеномов, отображающих генетическое разнообразие конкретного вида, рода, семейства. Это достигается включением в пангеном генотипов различного происхождения, относящихся к разным внутривидовым таксонам. Генотипы могут отличаться по однонуклеотидным заменам (далее SNP) и инсерциям или делециям – инделям (далее InDel). Часто в пангеном включают генотипы, представленные местными образцами, что позволяет частично избежать проблем, связанных с «узким горлышком селекции». Таким образом, пангеном служит отличным инструментом для поиска и анализа полиморфизма генов у представителей определенного вида и, в частности, может быть использован для анализа полиморфизма генов, ответственных за короткостебельность культурного ячменя.

В данном исследовании (1) проведена систематизация литературных данных об аллельных вариантах основных генов короткостебельности ячменя – *HvGA20ox2*, *HvBRI1*, *HvDep1* и перспективного гена *Sln1*; (2) информация об аллельном составе данных генов дополнена результатами анализа *in silico* их последовательностей, представленных в пангеноме ячменя, что позволило выявить новые мутации и гаплотипы, потенциально связанные с короткостебельным фенотипом.

Пангеном ячменя для анализа *in silico* генов короткостебельности

Недавно опубликованный пангеном ячменя (Jayakodi et al., 2024; https://plants.ensembl.org/index.html) включает аннотированные полногеномные сборки 53 генотипов культурного ячменя различного происхождения. Для получения репрезентативной выборки авторами подобраны образцы, различающиеся по географическому происхождению, рядности колоса и типу развития. Значительная часть образцов (36) относится к местным формам, при этом особое внимание уделено образцам из центра разнообразия ячменя на Ближнем Востоке (Йемен, Сирия, Турция, Иран, Афганистан). Кроме того, в наборе присутствуют 17 селекционных сортов разного происхождения, в том числе: сорт ‘Morex’, на основе которого собран референсный геном; два элитных европейских сорта для производства солода (‘RGT Planet’ и ‘Hockett’); два сорта с высокой эффективностью к трансформации (‘Golden Promise’ и ‘Igri’); немецкий сорт ‘Barke’ – родительская форма нескольких картирующих популяций; три сорта, имеющие агрономическое и научное значение, выступающие в качестве родителей для получения мутантов (‘Bonus’, ‘Foma’ и ‘Bowman’). Среди них 25 двурядных, 26 шестирядных и 2 интермедиальных. В зависимости от типа развития образцы набора классифицированы как яровые (39), озимые (10) и двуручки (3 образца).

Пангеном ячменя как нельзя лучше подходит для анализа генов короткостебельности, поскольку он включает образцы с уже идентифицированными аллелями данных генов и образцы с аллелями дикого типа (далее WT), что упрощает сравнительную характеристику при анализе *in silico*. Так, сорта ‘Morex’ и ‘Bowman’ относятся к дикому типу по всем трем изучаемым генам (Chono et al., 2003; Jia et al., 2009; Dockter, Hansson, 2015; Teplyakova et al., 2017); сорт ‘Golden Promise’ является носителем аллеля *ari-e.GP* гена *HvDep1* (Wendt et al., 2016); сорта ‘Barke’ и ‘RGT Planet’ унаследовали от сорта ‘Triumph’ аллель *sdw1.d* гена *HvGA20ox2* (Teplyakova et al., 2017; Jayakodi et al., 2020); геном линии Akashinriki содержит аллель *uzu1.a* гена *HvBRI1* (Chono et al., 2003).

Для поиска в пангеноме ячменя генов короткостебельности мы применяли алгоритм BLAST с использованием референсных последовательностей генов из баз данных NCBI: *HvGA20ox2* (LOC123445118), *Sln1* (LOC123447390), *HvBRI1* (LOC123444284), *HvDep1* (мРНК – FJ039903.1). Для всех 53 генотипов культурного ячменя успешно найдены и извлечены последовательности всех четырех генов, аннотированных ранее (Electronic Supplementary Materials, Table S1)[1]. Исключение составили несколько аллелей (см. далее), нонсенс-мутации в которых приводили к появлению сильно укороченных белков, что не позволяло алгоритмам автоматической аннотации идентифицировать их. Такие последовательности были определены нами исключительно по гомологии, с использованием BLAST.

Дополнительно, с целью охарактеризовать полиморфизм промоторных участков, для каждого гена изучили

[1] Приложение таблица S1 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: (https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o12) / See Electronic Supplementary Materials in the online version of this article: (https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o12).

области «вверх по течению», охватывающие примерно 1000 пн до стартового кодона, что должно быть достаточно для покрытия регуляторных последовательностей генов.

Выравнивание аминокислотных последовательностей белковых продуктов генов, а также нуклеотидных последовательностей участков с промотором проводили при помощи программ MEGA11 (https://www.megasoftware.net) и Unipro UGENE v.52.0 (Okonechnikov et al., 2012). Для построения филогенетических деревьев использовали метод невзвешенной попарной группировки с усреднением (unweighted pair group method using arithmetic averages – UPGMA) на основе эволюционных расстояний, вычисленных методом максимального составного правдоподобия (maximum composite likelihood) и выраженных в количестве нуклеотидных замен на сайт. Анализ проведен в программе MEGA11.

Обозначения аминокислотных замен и инделей приведены в тексте статьи и приложениях согласно общепринятой номенклатуре HGVS (https://hgvs-nomenclature.org). Префиксы «c.» и «p.» в начале обозначений (например c.-45T>G) указывают на отношение описываемых мутаций к кДНК (cDNA) или белку (protein) определенного гена соответственно.

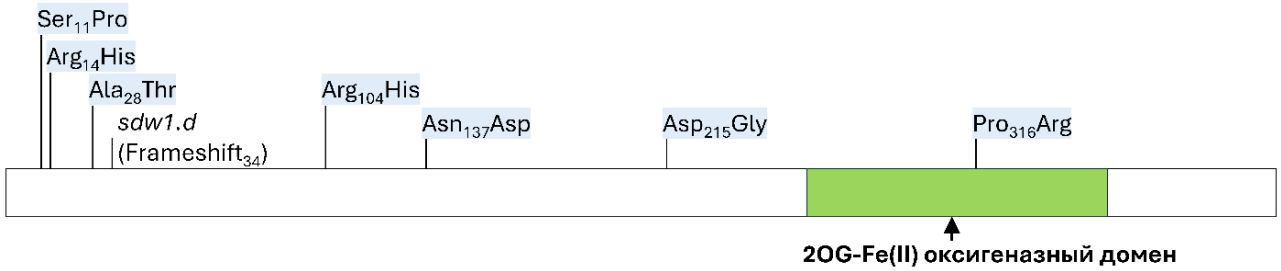


Рис. 1. Схема белка, кодируемого геном *HvGA20ox2*. Аннотация дана согласно ресурсу Pfam, доступному на сайте InterPro (https://www.ebi.ac.uk/interpro).
Синим обозначены аминокислотные замены, выявленные в пангеноме ячменя

Fig. 1. Schematic diagram of the protein encoded by the *HvGA20ox2* gene. The annotation is based on the Pfam resource available on the InterPro website (https://www.ebi.ac.uk/interpro).
Amino acid substitutions identified in the barley pangenome are highlighted in blue

Анализ гена *HvGA20ox2*
Литературные сведения о функции и полиморфизме гена

Большую роль в селекции короткостебельных форм культурного ячменя играет локус *sdw1/denso.* В качестве функционального гена этого локуса идентифицирован ген *HvGA20ox2* – ортолог гена *OsGA20ox2* риса (Jia et al., 2009; Xu et al., 2017). Ген *HvGA20ox2* кодирует гиббереллин-20-оксидазу (белок размером 414 АК), которая участвует в предпоследнем этапе синтеза фитогормона роста гиббереллина (далее ГА) – преобразует промежуточные формы $ГА_{12}$ и $ГА_{53}$ в их соответствующие C_{19}-формы $ГА_9$ и $ГА_{20}$, служащие предшественниками биологически активных форм $ГА_4$ и $ГА_1$ (Sakamoto et al., 2004; Hausinger, 2015; Xu et al., 2017; Gao, Chu, 2020).

У ячменя ген *HvGA20ox2* локализован на хромосоме 3HL и представлен нуклеотидной последовательностью длиной 4831 пн (аллель дикого типа), содержащей 3 экзона и достаточно большие нетранслируемые районы на 5′- и 3′-концах (5′-UTR и 3′-UTR) (Jia et al., 2009; Xu et al., 2017). Белковый продукт гена содержит консервативный домен 2-оксоглутарат-зависимой Fe(II)-диоксигеназы (2OG-FeII_Oxy, PF03171), типичный для суперсемейства 2-оксоглутарат-зависимых диоксигеназ (рис. 1). Данный домен обеспечивает координацию кофакторов (Fe(II) и 2-оксоглутарата) и катализирует гидроксилирование гиббереллинов (Hausinger, 2015).

Мутанты по гену *HvGA20ox2* обладают короткостебельным фенотипом и чувствительны к обработке экзогенной ГА, что подтверждает участие этого гена в синтезе фитогормона. Существует по меньшей мере несколько различных аллелей гена *HvGA20ox2*:

1) аллель *sdw1.c* (изначально *denso*), обнаруженный у датского сорта ‘Abed Denso’, является одним из источников короткостебельности естественного происхождения (Haahr, von Wettstein, 1976). Данный аллельный вариант имеет делецию одной пары нуклеотидов и инсерцию размером 4 пн в районе 5′-UTR, а также ряд других мутаций в кодирующей части гена, которые, однако, не затрагивают аминокислотную последовательность белка (Xu et al., 2017; Xie et al., 2024). За счет мутаций в 5′-UTR аллель обладает сниженной экспрессией, приводящей к полукарликовому фенотипу. Аллель *sdw1.c* успешно перенесен в сорта ‘Deba Abed’ и ‘Maris Mink’, через которые введен в селекционный процесс на юге Швеции и Дании;

2) аллель *sdw1.a* индуцирован в сорте ‘Jotun’ посредством рентгеновского излучения и характеризуется полной делецией самого гена *HvGA20ox2* (Mickelson, Rasmusson, 1994; Xu et al., 2017). Данный аллель в основном используется в западных штатах США, Канаде и Австралии для создания сортов ячменя кормового направления, таких как ‘Yerong’ и ‘UC828’ (Jia et al., 2009);

3) аллель *sdw1.e* получен у сорта ‘Risø no. 9265’, созданного в рамках селекционной программы с помощью воздействия нейтронами на растения сорта ‘Bomi’. Как и у аллеля *sdw1.a*, у аллеля *sdw1.e* обнаружена полная делеция гена *HvGA20ox2* (Haahr, von Wettstein, 1976; Jia et al., 2015). Однако информации по внедрению данного аллеля в другие сорта современной селекции нет;

4) мутантный аллель *sdw1.d* (*sdw1/denso*) у сорта ‘Diamant’ получен путем рентгеновского облучения сорта ‘Valticky’ в 1965 г. Аллель *sdw1.d* является единственным, фенотипическое проявление которого связано с изменениями в кодирующей последовательности: он несет делецию 7 пн в первом экзоне, приводящую к сдвигу рамки считывания и к укороченному белковому продукту (Xu et al., 2017). Доказан эффект этой делеции на снижение

высоты растений примерно на 13 см, а также на задержку времени цветения на 3–5 дней, независимо от факторов окружающей среды (Teplyakova et al., 2017). С другой стороны, для аллеля *sdw1.d* не обнаружено существенного влияния ни на показатели качества зерна (содержание белка и крахмала), ни на массу 1000 зерен (Teplyakova et al., 2017). В связи с отсутствием этих нежелательных плейотропных эффектов аллель *sdw1.d* играл ключевую роль для селекции – сорт 'Diamant' использован для успешного создания более 150 новых европейских сортов, особенно пивоваренного направления (Bouma, 1967);

5) аллель *sdw1.ins* характеризуется тандемно расположенными в 5′-UTR инсерциями размером 4 пн (как у аллеля *sdw1.c*) и 162 пн (транспозон Thalos_2) в позиции –312 пн от стартового кодона. Данный аллель обнаружен нами у местных образцов различного происхождения (Lukina et al., 2024);

6) аллель *sdw1.ZU1* имеет вставку 96 пн в промоторной области. За счет изменения активности промотора гена *HvGA20ox2* этот аллель ассоциирован со сниженной высотой растений на 14% и увеличением всхожести семян на 18% относительно дикого типа. Данный аллель выявлен в восточноазиатских и российских сортах ячменя, считается перспективным для селекции пивоваренных сортов (Xie et al., 2024).

Таким образом, мутации в гене *HvGA20ox2* оказывают плейотропный эффект, то есть влияют на многие признаки, в том числе на общую адаптивность, зерновую продуктивность и качество зерна (Kuczyńska et al., 2014; Teplyakova et al., 2017). Основная характеристика – уменьшение длины междоузлий стебля и повышение устойчивости к полеганию. Полукарликовые сорта с мутациями в гене *sdw1/denso* входят в родословные большинства современных сортов ячменя для кормовых целей в западных штатах США, Канаде, Австралии, а также в родословные пивоваренных сортов Европы (Jia et al., 2009).

Анализ гена *in silico*

Анализ промоторной области

В качестве промоторной области изучен участок до 970 пн вверх по течению от стартового кодона (–970 пн). У 53 генотипов ячменя на данном участке всего выявлено 15 InDel-мутаций и 38 однонуклеотидных замен – SNPs. Доля генотипов с мутантным типом промотора (отличных от сортов 'Bowman' и 'Morex') составила 62,26%. Различные сочетания мутаций в промоторной области рассматривали как гаплотипы, всего у образцов в пангеноме ячменя выделено 10 гаплотипов (Electronic Supplementary Materials, Table S2[2]; рис. 2).

Гаплотип #1 (WT) наиболее представлен в выборке, он включает 20 генотипов, среди которых сорта 'Bowman' и 'Morex' – носители аллеля дикого типа по литературным источникам (Jia et al., 2009) Данный гаплотип объединял как сорта европейской и американской селекции, так и местные формы преимущественно из стран Средиземноморья.

Гаплотип #2 соответствует аллелю *sdw1.c* (см. Electronic Supplementary Materials, Table S2; см. рис. 2): в районе 5′-UTR его последовательность имеет вставку 4 пн и однонуклеотидную делецию; кроме того, образцы с гаплотипом #2 имеют и другие типичные для *sdw1.c*-аллеля SNPs в первом и третьем экзонах и в области 3′-UTR (Xu et al., 2017).

Гаплотипы #3 и #4 содержат крупные вставки в 5′-UTR, одна из которых идентична ранее описанной нами для аллеля *sdw1.ins*, а другая отличается от нее по девяти SNPs:

– инсерция размером 162 пн (гаплотип #4; аллель *sdw1.ins-1*) ранее была описана нами как аллельный вариант *sdw1.ins* (Lukina et al., 2024). Она выявлена у 8 местных образцов из Эфиопии, Турции, Чехии, Ирана и Йемена;

– инсерция 167 пн (гаплотип #3; аллель *sdw1.ins-2*) представляет собой новый вариант, выявленный у 7 местных образцов из стран Передней и Центральной Азии (см. Electronic Supplementary Materials, Table S2; см. рис. 2).

Гаплотипы #5 и #8 характеризуются наличием вставки в промоторной области гена, соответствующей описанию для недавно открытого аллеля *sdw1.ZU9* (Xie et al., 2024), однако по данным анализа *in silico*, уточненный размер этой вставки составляет 94 пн (вместо ранее описанных 96 пн). В пангеноме ячменя выявлено два варианта инсерции, которые различаются (см. Electronic Supplementary Materials, Table S2; см. рис. 2) по четырем SNPs:

– первый вариант, аллель *sdw1.ZU9-1* (**гаплотип #5**), характерен для образцов 'Akashinriki', ZDM02064 и 'Chikurin Ibaraki' из Японии и Китая;

– второй вариант, аллель *sdw1.ZU9-2* (**гаплотип #8**), найден у образца HOR 1702 из Афганистана. Кроме вставки, гаплотипы #5 и #8 различаются также по трем SNPs.

Остальные гаплотипы в пангеноме ячменя представлены либо двумя (**гаплотип #6** и **#7**), либо единичными образцами (**#9** и **#10**) (см. Electronic Supplementary Materials, Table S2; см. рис. 2).

Анализ аминокислотной последовательности белка

В последовательности белка гена *HvGA20ox2* выявлено семь аминокислотных замен, а также сдвиг рамки считывания, вызванный делецией 7 пн (аллель *sdw1.d*), приводящий к синтезу укороченной полипептидной цепи. На основе этих изменений выделено шесть типов кодируемого белка (табл. 1, см. рис. 1).

I тип белка (WT) встречался у 34 генотипов различного происхождения и селекционного уровня, имеющих гаплотипы промотора #1, #2, #3 и #10 (см. табл. 1, рис. 1); в том числе этот тип белка имеют аллельные варианты *sdw1.c* и *sdw1.ins-2* (гаплотипы промотора соответственно #2 и #3).

II тип белка характеризуется одной аминокислотной заменой N137D. Он выявлен у шести генотипов из Азии с гаплотипами промотора #5, #6 и #8. Гаплотипы #5 и #8 соответствуют аллелям *sdw1.ZU9-1* и *sdw1.ZU9-2* (см. табл. 1, рис. 1). Таким образом, эти аллели различаются по промоторной области, но имеют один тип кодируемого полипептида.

III тип белка содержит наибольшее число аминокислотных замен (см. табл. 1). По промоторной области он соответствует гаплотипу #4, куда вошло восемь образцов пангенома с аллелем *sdw1.ins-1* (см. табл. 1, рис. 1). С учетом наличия мутаций как в промоторе, так и в кодирующей области, данный аллель, весьма вероятно, может быть связан с изменением высоты растений.

[2] Приложение таблица S2 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: (https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o12) / See Electronic Supplementary Materials in the online version of this article: (https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o12).

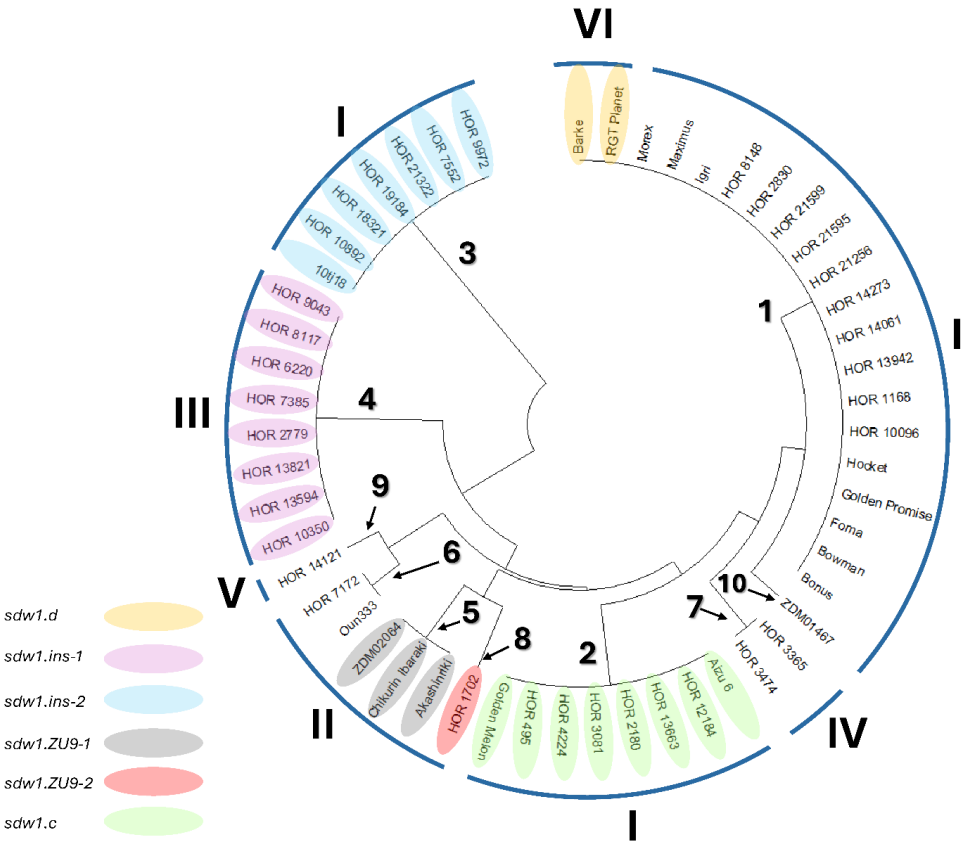


Рис. 2. Круговая дендрограмма, построенная на основе анализа последовательности промоторной области гена *HvGA20ox2* методом UPGMA. Арабскими цифрами внутри дерева обозначены гаплотипы промоторной области, римскими цифрами – принадлежность гаплотипов к определенному типу белка гена

Fig. 2. A circular dendrogram based on the sequence analysis of the *HvGA20ox2* gene promoter region by UPGMA. Arabic numerals within the tree indicate promoter region haplotypes, and Roman numerals indicate the specific protein type of the gene that each haplotype corresponds to

IV и V типы белка содержат по две и три аминокислотные замены соответственно. IV тип белка характерен для двух генотипов из Непала с гаплотипом промотора #7. В свою очередь, V тип белка интересен заменой P316R в консервативном функциональном домене 2-оксоглутарат-зависимой Fe(II)-диоксигеназы (см. табл. 1, рис. 1), что потенциально может быть связано с фенотипическим проявлением. Данный тип белка обнаружен только у одного образца из Сирии с гаплотипом промотора #9 (см. рис. 2).

VI тип белка представляет собой укороченный полипептид, что обусловлено делецией 7 пн в первом экзоне гена и сдвигом рамки считывания, характерным для аллеля *sdw1.d*. В пангеноме ячменя выявлено два сорта европейской селекции с этим аллелем (см. табл. 1, рис. 1).

Таким образом, в пангеноме ячменя были выявлены как уже известные аллели гена *HvGA20ox2* (*sdw1.c*, *sdw1.d*, *sdw1.ins* и *sdw1.ZU9*), так и новые. Недавно открытые аллели *sdw1.ins* и *sdw1.ZU9* при анализе *in silico* дифференцированы на подтипы *sdw1.ins-1*/*sdw1.ins-2* и *sdw1.ZU9-1*/*sdw1.ZU9-2*. Показано, что фенотипическое проявление аллелей *sdw1.c* и *sdw1.ins-2*, вероятнее всего, связано с изменениями промоторной области, *sdw1.ins-1*, *sdw1.ZU9-1*/*sdw1.ZU9-2* – с мутациями как в промоторной области, так и в белке, а *sdw1.d* – исключительно с изменениями в кодирующей области. У незначительного числа образцов из пангенома выявлены потенциально новые аллели гена *HvGA20ox2*: образец ZDM01467 имел редкий уникальный гаплотип промоторной области (#10) и белок дикого типа; два других образца (HOR 7172, Oun333) были с белком, характерным для аллеля *sdw1.ZU9* (двух его подтипов), но отличались уникальным гаплотипом промотора (#6); выявлены образцы с сочетанием уникального типа белка (IV и V) и промоторной области (#7 и #9 соответственно). Фенотипическое проявление всех этих новых вариантов генетической изменчивости гена *HvGA20ox2* еще только предстоит изучить.

Анализ гена *Sln1*
Литературные сведения о функции и полиморфизме гена

Нарушения в процессах передачи сигнала ГА – еще один из механизмов, приводящих к короткостебельности, которая может сохраняться даже при внесении большой концентрации экзогенных ГА. У риса и мягкой пшеницы в рецепции ГА участвуют гены *Slr1* и *Rht-1* (у мягкой пшеницы ген *Rht-1* представлен тремя гомеологичными копиями *Rht-A1*, *Rht-B1*, *Rht-D1*) (Peng et al., 1999; Ikeda et al., 2001). У культурного ячменя ортологом этих генов является ген *Sln1*, аминокислотная последовательность которого на 97% гомологична таковой гена *Rht-D1* мягкой пшеницы (Peng et al., 1999; Chandler et al., 2002; Fu et al., 2002). Показано, что ген *Sln1*, в отличие от *Rht*-генов, не имеет интронов (Chandler et al., 2002).

Ген *Sln1* у культурного ячменя (длина 2588 пн у сорта ‘Morex’) расположен на хромосоме 4H и представлен только одним экзоном, кодирующим белок в 618 АК. Как

Таблица 1. **Классификация кодируемого геном *HvGA20ox2* белка по аминокислотным заменам, выявленным в пангеноме ячменя. Плюсом обозначены изменения, произошедшие относительно дикого типа**

Table 1. **Classification of the *HvGA20ox2*-encoded protein according to amino acid substitutions identified in the barley pangenome. Plus signs indicate changes relative to the wild type**

Тип белка / Protein type	Известный аллельный вариант[1] / Known allelic variant[1]	Аминокислотные замены / Amino acid substitutions								Число образцов / Number of accessions
		p.S11P[2]	p.R14H	p.A28T	p.Ala34fs[3]	p.R104H	p.N137D	p.D215G	p.P316R	
I	*wt*	–	–	–	–	–	–	–	–	18
	sdw1.c	–	–	–	–	–	–	–	–	8
	sdw1.ins-2	–	–	–	–	–	–	–	–	7
	–									1
II	*sdw1.ZU9-1*	–	–	–	–	–	+	–	–	3
	sdw1.ZU9-2						+			1
	–	–	–	–	–	–	+	–	–	2
III	*sdw1.ins-1*	–	+	–	–	+	+	+	–	8
IV	–	+	–	–	–	–	+	–	–	2
V	–	–	–	+	–	–	+	–	+	1
VI	*sdw1.d*	–	–	–	+	–	–	–	–	2

Примечание: 1 – известные из литературы аллели *sdw1.ins* и *sdw1.ZU9* были дифференцированы в процессе анализа пангенома *in silico*; 2 – префикс «p.» указывает на отношение описываемых мутаций к последовательности белка, согласно номенклатуре HGVS (https://hgvs-nomenclature.org/); 3 – окончание «fs» обозначает сдвиг рамки считывания, согласно HGVS

Note: 1 – the *sdw1.ins* and *sdw1.ZU9* alleles known from published sources were differentiated during the *in silico* pangenome analysis; 2 – the p. prefix indicates the relationship of the described mutations to the protein sequence according to the HGVS nomenclature (https://hgvs-nomenclature.org/); 3 – the fs ending denotes a frameshift according to HGVS

и его ортологи, ген *Sln1* отвечает за синтез DELLA-белков, которые являются центральными регуляторами сигнального пути ГА: они подавляют рост, опосредованный ГА (Chandler, Robertson, 1999; Thomas et al., 2016; Gao, Chu, 2020). Биоактивная форма ГА – гиббереллловая кислота ($ГА_3$, GA_3) – ослабляет репрессию, вызванную DELLA: $ГА_3$ вступает в связь с белком – рецептором гиббереллина GID1 (Gibberellin Insensitive Dwarf 1), образуя рецепторный комплекс GID1-GA_3, который затем связывается с DELLA, подвергается убиквитинированию и деградации в протеасоме; тем самым происходит снижение концентрации DELLA-белков в клетках, ингибирующих рост растений (Fu et al., 2002; Gao, Chu, 2020).

DELLA-белки относятся к семейству регуляторов транскрипции GRAS (название состоит из первых букв трех белков, где был обнаружен GRAS-домен: Gibberellic Acid Insensitive, GAI; Repressor of *ga1-3*, RGA; ScareCRow, SCR) (Thomas et al., 2016); в их состав входит два домена, включающие в себя различные функциональные мотивы: N-концевой регуляторный домен, содержащий консервативный мотив из четырех АК – DELLA, и С-концевой функциональный домен GRAS (рис. 3) (Chandler, Harding, 2013; Thomas et al., 2016). N-концевой домен важен для распознавания $ГА_3$ и связывания белков DELLA с комплексом GID1-GA, все мутации в нем имеют доминантный или полудоминантный характер (Chandler, Harding, 2013). У мягкой пшеницы в гомеологичных генах *Rht-B1* и *Rht-D1* описаны нонсенс-мутации, приводящие к синтезу укороченного с N-конца белка. Этот мутантный белок неспособен связываться с GID1-GA, в результате происходит накопление DELLA-белков в клетках, вызывающее короткостебельный фенотип (Peng et al., 1999; Pearce et al., 2011). Кроме того, у мягкой пшеницы известны аллели с инсерциями в промоторной и кодирующей областях, которые ассоциированы как с уменьшением, так и с увеличением высоты растений (Pearce et al., 2011; Chandler, Harding, 2013; Li A. et al., 2013; Lou et al., 2016).

У культурного ячменя и риса описано два фенотипических проявления мутаций в белке, кодируемом генами *Slr1* и *Sln1*: короткостебельный фенотип, вызванный мутациями в N-концевом регуляторном домене, а также фенотип типа slender, представляющий собой быстрорастущие, удлиненные, тонкие, стерильные растения (Ikeda et al., 2001; Chandler et al., 2002; Fu et al., 2002; Chandler,

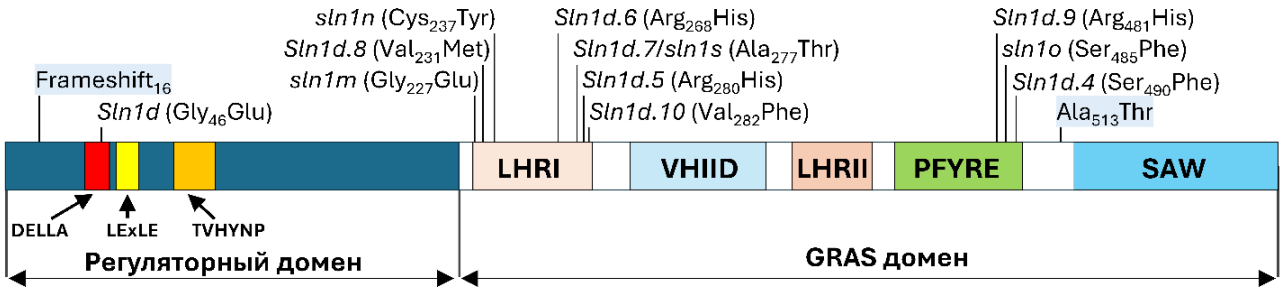


Рис. 3. Схема белка, кодируемого геном *Sln1*. Аннотация дана согласно ранее аннотированному продукту гена-ортолога *Slr1* риса (NP_001405437.1). Локализация индуцированных мутаций дана согласно P. M. Chandler, C. A. Harding (2013).
Синим выделены изменения в аминокислотном составе, выявленные в пангеноме ячменя

Fig. 3. A diagram of the protein encoded by the *Sln1* gene. The annotation is based on the previously annotated product of the rice ortholog gene *Slr1* (NP_001405437.1). Localization of induced mutations is given according to P. M. Chandler and C. A. Harding (2013).
Amino acid changes identified in the barley pangenome are highlighted in blue

Harding, 2013). Такие генотипы несут мутации в функциональном С-концевом домене GRAS, приводящие к потере репрессорной функции DELLA-белков, в результате чего происходит конститутивная активация GA-сигналинга (Chandler et al., 2002; Chandler, Harding, 2013). У ячменя с помощью серии индуцированных мутаций показана специфичность их фенотипического проявления в зависимости от расположения в GRAS-домене, отвечающем за межбелковые взаимодействия (Chandler, Harding, 2013). Растения с данными мутациями характеризуются резким удлинением стебля, увеличением экспрессии α-амилазы в клетках алейронового слоя; в то же время происходит значительное сокращение длины корней за счет уменьшения размера клеток (Moriconi et al., 2019).

Гены *Rht-B1* и *Rht-D1* мягкой пшеницы имеют несколько аллельных вариантов как естественного, так и искусственного происхождения, которые активно вовлекаются в селекционный процесс (Hedden, 2003; Pearce et al., 2011; Thomas, 2017). В случае культурного ячменя влияние гена *Sln1* на высоту растения изучалось только путем искусственного мутагенеза с участием сортов 'Hymalaya' и 'Herta' (Chandler et al., 2002; Fu et al., 2002; Chandler, Harding, 2013). В результате получены мутанты *sln1a* с потерей функции и другие полиморфные аллельные варианты гена (см. рис. 3): *sln1b*, *sln1c*, *Sln1d* (и их производные) с мутациями, затрагивающими N-концевой домен (Chandler et al., 2002; Chandler, Harding, 2013), а также аллели *sln1m*, *sln1n*, *sln1o*, *sln1s* с мутациями в С-концевом домене (Chandler, Harding, 2013). Природный же полиморфизм гена *Sln1* в местных и селекционных сортах ячменя ранее никем не изучался. Анализ последовательностей этого гена в пангеноме ячменя позволит выявить полиморфные участки, которые потенциально могут быть связаны в том числе и с короткостебельностью.

Анализ гена *in silico*

При извлечении последовательностей гена *Sln1* из пангенома ячменя оказалось, что у образцов HOR 19184 и HOR 7172 не был указан Gene ID, поскольку из-за наличия в их геномах нонсенс-мутаций, приводящих к появлению сильно укороченного белка, они не были идентифицированы алгоритмами автоматической аннотации. Последовательности этих образцов идентифицированы в их геномах методами BLAST-анализа.

Анализ промоторной области

В качестве промоторной области у гена *Sln1* изучен участок до −993 пн от стартового кодона. В данной области у 34 (64,15%) генотипов ячменя выявлено 47 SNPs и 12 InDels (последовательности остальных образцов относились к дикому типу). На основе комбинаций этих мутаций выделено 13 гаплотипов (Electronic Supplementary Materials, Table S3[3], Electronic Supplementary Materials, Figure S1[4]):

Гаплотип #1 (WT) выявлен у 19 образцов двурядного ячменя разного происхождения и селекционного уровня: два сорта из Японии, по одному сорту из США, Чехии и Польши. Местные образцы были из Испании, Греции, Ливии, Турции, России, Афганистана, Непала, Пакистана, Таджикистана и Китая.

Гаплотип #2 характеризовался одновременным присутствием 26 различных SNPs или InDels, каждый из которых не был уникальным, то есть встречался у других гаплотипов (см. Electronic Supplementary Materials, Table S3, см. Electronic Supplementary Materials, Figure S1). В пангеноме он был наиболее распространен – встречался у 21 образца (10 сортов и 11 местных форм) различного географического происхождения.

Гаплотипы #3 и **#4** представлены двумя генотипами каждый: гаплотип #3 определен у двух местных образцов, а гаплотип #4 выявлен у двух сортов из Японии. Гаплотип #3 имел 30 SNP/InDel, 16 из которых были общими с гаплотипом #2. Гаплотип #4 отличался от дикого типа (гаплотип #1) только одним SNP (c.-548G>T), который был уникальным (см. Electronic Supplementary Materials, Table S3, см. Electronic Supplementary Materials, Figure S1).

Остальные **гаплотипы** (**#5–13**) представлены лишь у единичных местных образцов ячменя.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой изменчивости промоторной области гена *Sln1* у генотипов культурного ячменя. Однако большая часть геноти-

[3] Приложение таблица S3 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: (https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o12) / See Electronic Supplementary Materials in the online version of this article: (https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o12).

[4] Приложение рисунок S1 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: (https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o12) / See Electronic Supplementary Materials in the online version of this article: (https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o12).

пов имеет гаплотип #2, остальные же гаплотипы в пангеноме представлены двумя либо единичными образцами. В промоторной области не обнаружено крупных инделей, которые могли бы привести к изменению фенотипа, как это было описано у гена *Rht-B1* мягкой пшеницы.

Анализ аминокислотной последовательности белка

В последовательности белка гена *Sln1* выявлено лишь две мутации: сдвиг рамки считывания, приводящий к синтезу укороченного полипептида за счет преждевременного стоп-кодона (образцы HOR 19184, HOR 7172 из Непала и Индии), а также аминокислотная замена A513T в GRAS-домене белка (образец HOR 21322 из Ирана). Всего выделено 3 типа белка (см. рис. 3). **I тип** соответствует белку дикого типа, а **II** и **III типы** характеризовались либо укороченной АК-последовательностью, либо заменой АК.

Таким образом, ген *Sln1* характеризовался достаточно низким полиморфизмом кодирующей области. Большинство генотипов ячменя (50 из 53) имели последовательность белка дикого типа. У ячменя не выявлено мутаций, аналогичных таковым у генов-ортологов *Rht-B1*, *Rht-D1* мягкой пшеницы (Peng et al., 1999; Pearce et al., 2011), а именно: нонсенс-мутаций в GRAS-домене и крупных инсерций в кодирующей области.

Анализ гена *HvBRI1*
Литературные сведения о функции и полиморфизме гена

Брассиностероиды (далее БР) относятся к важной группе стероидных фитогормонов, задействованных в процессах роста и развития растений, а также в осуществлении реакции на биотический и абиотический стресс (Singh, Savaldi-Goldstein, 2015). На настоящий момент идентифицировано более 70 различных химических соединений БР, они обнаружены более чем у 100 видов растений, во всех органах, включая корни (Peres et al., 2019).

За сигнальный путь БР у арабидопсиса отвечает ген *BRI1* (*Brassinosteroid-Insensitive1*), кодирующий рецепторную киназу, относящуюся к семейству серин-треониновых протеинкиназ – Leucine-Rich Repeat Receptor-Like Kinase (Shiu, Bleecker, 2001). В состав полипептида входит внеклеточный домен с лейцин-богатыми повторами (далее LRR), трансмембранный домен и внутриклеточный высококонсервативный домен серин-треониновой киназы (Zada et al., 2024). LRR-домен содержит 25 тандемных повторов (у ячменя и риса их 22) и остров из 70 АК между повторами LRR-21 и LRR-22. Этот остров вместе с LRR-22 отвечает за связывание с молекулами БР. Домен серин-треониновой киназы отвечает за инициацию передачи сигнала БР (Zada et al., 2024).

У культурного ячменя ортологичный ген *HvBRI1* (старое название – *uzu*) выявлен на хромосоме 3HS с помощью вырожденных праймеров, разработанных на основе белковой последовательности генов *BRI1 Arabidopsis* и *OsBRI1* риса (Chono et al., 2003). Последовательность *HvBRI1* длиной 3900 пн представлена одним экзоном, кодирующим белок из 1118 АК. В настоящий момент описан только один ассоциированный с короткостебельностью природный аллель гена *HvBRI1*, названный *uzu1.a*. Этот аллель несет миссенс-мутацию c.2612A>G, приводящую к замене H857R в консервативном киназном домене (Chono et al., 2003). Мутанты с *uzu1.a* имеют выраженный короткостебельный фенотип (Saisho et al., 2004; Chen et al., 2016). Фенотипическое проявление при наличии данного аллеля – укороченный колеоптиль; небольшой крючок или выступ на верхушке колеоптиля; укороченные широкие темно-зеленые листья; укороченные стебель, колос, ости, цветковые чешуи; небольшие зерновки (Saisho et al., 2004; Chen et al., 2016). Такие особенности позволяют высевать растения более плотно и применять высокие дозы удобрений. Сорта с аллелем короткостебельности *uzu1.a* занимают более 70% посевных площадей ячменя в Японии и более 30% посевных площадей на Корейском полуострове. В настоящее время более половины голозерных форм ячменя, выращиваемых в южной части Японии, – носители аллеля *uzu1.a* (Saisho et al., 2004). В последовательности гена описаны и другие замены: так, почти изогенная линия Akashinriki II содержит замены A79F и L1028V в N- и C-концевых участках полипептида соответственно, однако, по-видимому, эти замены не сказались на высоте растений (Chono et al., 2003; Dockter et al., 2014).

Остальные аллели гена *HvBRI1* получены с помощью мутагенеза, а именно аллели *uzu1.256*, *uzu1.297*, *uzu1.301*, *093AR*, *uzu1.b* (другое название – *ert-ii79*), *uzu1.c*, *M6945*, *M6649*. Носители этих аллелей имеют короткостебельный фенотип разной степени выраженности (Dockter et al., 2014; Jiang et al., 2022), а также отличаются различными показателями продуктивности. Например, мутантная линия M6649 со сниженной на 10–20 см высотой растений по степени озерненности колоса была идентична дикому типу (Jiang et al., 2022).

В совокупности все аллели гена *HvBRI1* имеют аминокислотные замены практически во всех доменах кодируемого полипептида (рис. 4), что делает их ценным инструментом для научных исследований и селекции (Dockter et al., 2014; Jiang et al., 2022).

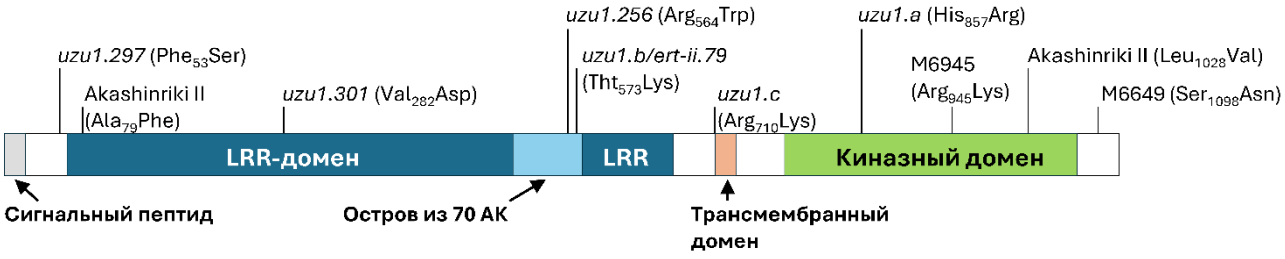


Рис. 4. Схема белка, кодируемого геном *HvBRI1*. Аннотация, а также сведения о существующих индуцированных мутациях даны согласно C. Dockter et al. (2014) и C. Jiang et al. (2022)

Fig. 4. Scheme of the protein encoded by the *HvBRI1* gene. The annotation and information on the existing induced mutations are given according to C. Dockter et al. (2014) and C. Jiang et al. (2022)

Анализ гена *in silico*

Нуклеотидные последовательности гена *HvBRI1*, включая его промоторную область, а также аминокислотные последовательности полипептида успешно извлечены из всех 53 генотипов культурного ячменя (см. Electronic Supplementary Materials, Table S1).

Анализ промоторной области

Промоторные последовательности гена *HvBRI1* характеризовались наименьшим полиморфизмом среди изученных в данной работе генов. В области до −1030 пн от стартового кодона только у 18 образцов из пангенома (остальные относились к дикому типу) было выявлено 4 SNPs и 16 различных InDels, в том числе одна достаточно крупная вставка размером 278 пн. Всего выделено 15 гаплотипов промоторной области (Electronic Supplementary Materials, Table S4[5]).

Гаплотип #1 (WT) выявлен у большинства (35 из 53) изученных образцов, которые имели различный селекционный уровень и происхождение. Остальные гаплотипы с различными мутациями в промоторной области составляли 34%. Все они были представлены либо двумя (**гаплотипы #2–5**), либо единичными образцами (**гаплотипы #6–15**).

Общими для большинства мутантных гаплотипов промотора были SNPs c.-133A>C и c.-396T>C, которые выявлены в гаплотипах #2–4, #7–12 и #14 преимущественно у образцов азиатского происхождения (см. Electronic Supplementary Materials, Table S4). **Гаплотип #5** характеризовался однонуклеотидной инсерцией в позиции −142, которая была уникальной. У генотипа HOR 9043 с **гаплотипом #6** была выявлена крупная инсерция 278 пн. **Гаплотип #13** отличался от WT тремя инсерциями, две из которых были уникальными (см. Electronic Supplementary Materials, Table S4). Необходимы дополнительные исследования по оценке потенциального влияния этих мутаций на экспрессию гена *HvBRI1*.

Анализ аминокислотной последовательности белка

Аминокислотная последовательность белка, кодируемого геном *HvBRI1*, была консервативной – в пангеноме у трех генотипов выявлена только одна АК-замена H857R, характерная для аллеля короткостебельности *uzu1.a* (см. рис. 4). Этот аллель обнаружен у японских сортов ‘Akashinriki’, ‘Chikurin Ibaraki’, а также у местного образца из Китая ZDM02064. Все остальные 50 генотипов имели последовательность белка дикого типа. Таким образом, полученные сведения о высокой консервативности последовательности белка, кодируемого геном *HvBRI1*, свидетельствуют о преимущественно регуляторных механизмах его действия.

Анализ гена *HvDep1*
Литературные сведения
о функции и полиморфизме гена

Помимо фитогормонов, у культурного ячменя известны и другие механизмы регуляции роста и развития. Так, описаны гетеротримерные G-белковые комплексы (далее G-белки), функция которых как у растений, так и у животных связана с передачей различных сигналов извне в клетку. G-белки контролируют такие механизмы, как рост, пролиферацию клеток, защитные системы и гормональные реакции (Urano et al., 2013). G-белки относятся к гетеротримерным белкам, их функциональный комплекс состоит из трех субъединиц Gα, Gβ и Gγ. (Urano et al., 2013). При этом у арабидопсиса и риса идентифицировано только по одной Gα- и Gβ-субъединице, а для Gγ описано три их типа (Li S. et al., 2012), что может указывать на зависимость функции G-белка именно от вовлеченной в его состав субъединицы Gγ (Chakravorty et al., 2011).

В геноме риса описано три гена: *GS3* (*Grain size 3*), *DEP1* (*Dense and erect panicle*) и *OsGGC2*, кодирующие Gγ-субъединицу типа C, которая характеризуется C-концевым доменом, богатым цистеином (Fan et al., 2006; Huang et al., 2009). Действие гена *GS3* оказывает влияние на размер зерна (Mao et al., 2010), а ген *DEP1* имеет плейотропное действие и наряду с короткостебельным фенотипом вызывает образование густой прямостоячей метелки (Fan et al., 2006; Huang et al., 2009).

У культурного ячменя локус *Breviaristatum-e* (*Ari-e*), ассоциированный с короткостебельностью, соответствует гену *HvDep1,* который на 94,8%, 81,2% и 88,8% идентичен ортологам пшеницы, кукурузы (*Zea mays* L.) и риса соответственно (Bélanger et al., 2014; Wendt et al., 2016). Данный ген размером в 1362 пн состоит из 5 экзонов, он кодирует белок размером 295 АК (рис. 5) (Wendt et al., 2016). Кроме того, последовательность *HvDep1* имеет достаточно длинный 5′-UTR, содержащий еще одну открытую рамку считывания (далее uORF), предположительно, кодирующую белок из 70 АК, функции которого в настоящий момент не изучены (Bélanger et al., 2014).

Ген *HvDep1* у культурного ячменя характеризуется достаточно низким природным полиморфизмом кодирующей области (Bélanger et al., 2014; Watt et al., 2020). Так, при анализе панели из 167 канадских сортов выявлено 32 SNPs и 5 InDels. Только три из этих SNPs оказались локализованы в экзонах, причем они не приводили к изменению аминокислотного состава белка (Bélanger et al., 2014). Однако в 5′-UTR гена *HvDep1*, а также в вышележащей области были выявлены полиморфные участки, в том числе делеция 9 пн, затрагивающая uORF и приводящая к укороченному белку из 67 АК вместо 70 АК. Показана ассоциация этой делеции с уменьшением размера зерна и массы 1000 зерен (Watt et al., 2020).

Все известные аллельные варианты гена *HvDep1* с изменениями в аминокислотном составе белка получены с помощью мутагенеза. Существует 7 мутантных линий *ari-e* (см. рис. 5), короткостебельный фенотип которых обусловлен либо мутациями в функциональном домене OSR, приводящими к синтезу укороченного полипептида (аллели *ari-e.1*, *ari-e.30*, *ari-e.119* и *ari-e.GP*), либо делецией всего гена (*ari-e.39*, *ari-e.156*, *ari-e.166*) (Wendt et al., 2016). Из перечисленных аллелей распространение в селекционном материале получил лишь аллель *ari-e.GP*, характеризующийся сдвигом рамки считывания, в результате которого полипептид содержит всего 66 АК. Носители мутантного аллеля *ari-e.GP* имеют полукарликовый фенотип с укороченными остями; плейотропным проявлением мутации является солеустойчивость (Pakniyat et al., 1997). Источником *ari-e.GP* является полукарликовый сорт ‘Golden Promise’, полученный как гамма-мутант от сорта ‘Maythorpe’ в 1956 г. в Великобритании (Sigurbjornsson, Micke, 1969). Сорт ‘Golden Promise’ обла-

[5] Приложение таблица S4 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: (https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o12) / See Electronic Supplementary Materials in the online version of this article: (https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o12).

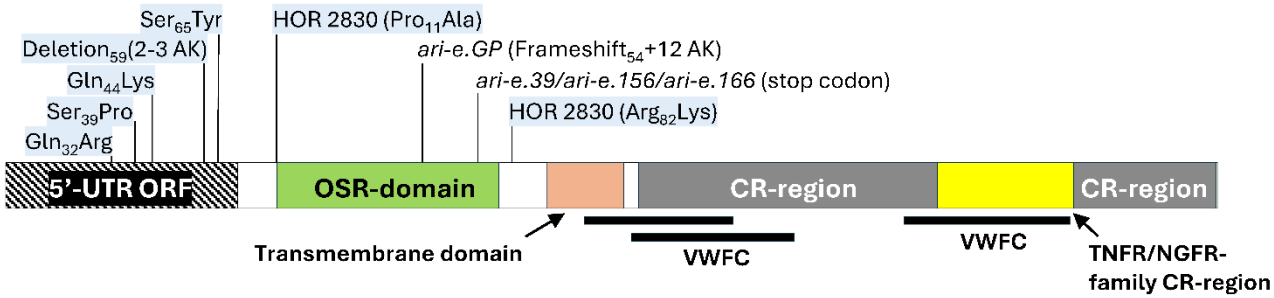


Рис. 5. Схема белка, кодируемого геном *HvDep1*. Аннотация, а также сведения о существующих индуцированных мутациях даны согласно T. Wendt et al. (2016) и S. Sun et al. (2018). Синим выделены изменения в аминокислотные составе, выявленные в пангеноме

Fig. 5. Scheme of the protein encoded by the *HvDep1* gene. The annotation and information on the existing induced mutations are given according to T. Wendt et al. (2016) and S. Sun et al. (2018). Amino acid changes identified in the pangenome are highlighted in blue

дает желательными агрономическими признаками, такими как короткая жесткая соломина и уменьшенная длина остей. Сам сорт и его производные до сих пор широко используются для производства виски.

Анализ гена *in silico*

Нуклеотидные последовательности гена *HvDep1*, включая его промоторную область, а также аминокислотные последовательности полипептида успешно извлечены из пангенома для всех 53 генотипов культурного ячменя (см. Electronic Supplementary Materials, Table S1). Последовательности сортов 'Golden Promise' и 'Maximus' найдены методом BLAST-анализа, поскольку из-за мутаций сдвига рамки считывания и сильно укороченного белка они не были идентифицированы алгоритмами аннотации (и не имели Gene ID).

Промоторная область гена *HvDep1* была наиболее полиморфной среди изученных в этом исследовании. В области до –1027 пн вверх по течению от стартового кодона у 43 (81,1%) генотипов выявлено 22 SNPs и 11 InDels (Electronic Supplementary Materials, Table S5[6], Electronic Supplementary Materials, Figure S2[7]), на основе их комбинаций выделено 12 гаплотипов:

Гаплотип #1 (WT) встречался лишь у 10 образцов из 53 (6 сортов и 4 местных образца). По происхождению сорта представлены образцами европейской селекции, плюс два местных образца из Африки (Ливия и Эфиопия) и еще два из Европы.

Гаплотип #2, отличающийся относительно дикого типа делецией 7 пн и заменой c.-1027T>C (см. Electronic Supplementary Materials, Table S5, см. Electronic Supplementary Materials, Figure S2), выявлен у 15 генотипов (4 сорта и 11 местных образцов). Большая часть местных форм происходила из Переднеазиатского центра разнообразия ячменя.

Гаплотип #3 содержал делецию 9 пн, ассоциированную с уменьшением размера семян и снижением массы 1000 зерен (Watt et al., 2020). В пангеноме ячменя выявлено 8 образцов с гаплотипом #3: два сорта из Японии и США и шесть местных форм из Эфиопии (2 образца), Турции (2 образца), Йемена и России.

Гаплотипы #4 и **#5** по SNP/InDel были достаточно близкими: они имели семь общих мутаций, а отличались лишь по трем SNPs и одной InDel. Эти гаплотипы обнаружены у образцов ячменя из Азии.

Гаплотип #6 обнаружен у трех местных образцов из Сирии, а **гаплотип #7** определен у двух местных образцов из Афганистана. Остальные **гаплотипы** (**#8–12**) представлены единичными генотипами (см. Electronic Supplementary Materials, Table S5, см. Electronic Supplementary Materials, Figure S2).

Следует отметить, что связанная с уменьшением размеров и массы зерна делеция размером 9 пн выявлена, кроме гаплотипа #3, еще у гаплотипов #7 и #12, но у большинства образцов (79,2%) отсутствовала (см. Electronic Supplementary Materials, Table S5). Это может свидетельствовать об отборе, направленном в сторону увеличения урожайности.

Анализ последовательности белка гена *HvDep1* показал достаточно высокую ее консервативность:

– **I тип белка** (дикий тип) выявлен у подавляющего числа генотипов (50 из 53);

– **II тип белка** обнаружен у местного образца HOR 2830, содержащего две аминокислотные замены P11A и R82L, не описанные в литературе ранее (см. рис. 5). Первая из этих замен потенциально может затрагивать ORS-домен, участвующий в регуляции размеров семян, а также других органов ячменя;

– **III тип белка** представляет собой укороченный белок, содержащий 54 нативных АК, после которых за счет сдвига рамки считывания и преждевременного стоп-кодона идут еще 12 АК, нехарактерных для белка дикого типа. Данная мутация характерна для аллеля короткостебельности *ari-e.GP*, которая выявлена у сорта 'Maximus', а также у контрольного образца 'Golden Promise'.

Дополнительно проведен анализ предполагаемого полипептида из 70 АК, кодируемого uORF в 5′-UTR гена *HvDep1*. В результате выявлено четыре АК-замены и два варианта делеций АК (см. рис. 5), на основе сочетаний которых выделено 7 типов белка. I тип белка (для uORF), или белок дикого типа, встречался у 31 генотипа с гаплотипами промотора #1, #2, #6, #8, #9 и #11. Остальные типы белка в 5′-UTR были мутантными и соотносились с тем или иным гаплотипом промотора (табл. 2; см. Electronic Supplementary Materials, Figure S2). Потребуются

[6] Приложение таблица S5 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: (https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o12) / See Electronic Supplementary Materials in the online version of this article: (https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o12).

[7] Приложение рисунок S2 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: (https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o12) / See Electronic Supplementary Materials in the online version of this article: (https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-1-o12).

Таблица 2. Классификация белкового продукта, кодируемого uORF гена *HvDep1*, по аминокислотным заменам, выявленным у образцов пангенома ячменя. Плюсом обозначены изменения, произошедшие относительно дикого типа

Table 2. Classification of the protein product encoded in the uORF of the *HvDep1* gene, based on amino acid substitutions identified in barley pangenome samples. Plus signs indicate changes relative to the wild type

Тип белка / Protein type	Аминокислотные замены / Amino acid substitutions						Число образцов / Number of accessions
	p.Q32R	p.S39P	p.Q44K	p.C60del	p.C60_C62del	p.S65Y	
I	–	–	–	–	–	–	31
II	–	–	–	–	+	–	8
III	+	–	–	–	+	–	2
IV	–	+	–	–	+	–	1
V	–	–	–	+	–	–	6
VI	+	–	–	+	–	–	4
VII	–	–	–	–	–	+	1

дополнительные исследования для изучения влияния этих мутаций в 5′-UTR на экспрессию гена *HvDEP1*. Таким образом, механизмы, связанные с влиянием гена *HvDep1* на рост и высоту растений, могут быть связаны с мутациями либо в 5′-UTR, либо в регуляторных последовательностях гена.

Заключение

Таким образом, на выборке из 53 образцов пангенома ячменя наиболее полиморфным среди изученных оказался ген ***HvGA20ox2***, для которого выделено 10 гаплотипов промоторной области и 6 типов белка. В пангеноме ячменя выявлены образцы с уже известными аллелями короткостебельности *sdw1.c*, *sdw1.d* и с недавно открытыми *sdw1.ins* и *sdw1.ZU9*, причем последние при анализе *in silico* были дифференцированы на подтипы *sdw1.ins-1*/*sdw1.ins-2* и *sdw1.ZU9-1*/*sdw1.ZU9-2*. Показано, что фенотипическое проявление аллелей *sdw1.c* и *sdw1.ins-2*, вероятнее всего, связано с изменениями промоторной области, *sdw1.ins-1*, *sdw1.ZU9-1*/*sdw1.ZU9-2* – с мутациями как в промоторной области, так и в белке, а *sdw1.d* – исключительно с изменениями в кодирующей области.

Ген ***Sln1*** характеризовался высокой консервативностью кодирующей последовательности (лишь у трех генотипов культурного ячменя обнаружены изменения в составе белка) при значительном полиморфизме промоторной области (выделено 13 гаплотипов). Отсутствие мутаций, аналогичных генам-ортологам *Rht-B1* и *Rht-D1* мягкой пшеницы, указывает на различные механизмы регуляции высоты растений пшеницы и ячменя.

Ген ***HvBRI1*** продемонстрировал наименьший уровень полиморфизма промоторной области (34% генотипов имели различные SNPs/InDels), а также характеризовался консервативной аминокислотной последовательностью белка. Единственная АК-замена H857R соответствует известному аллелю короткостебельности *uzu1.a*, который выявлен у японских сортов и местного образца из Китая. По-видимому, существует не так много естественных вариаций данного гена, оказывающих влияние на высоту растений.

Ген ***HvDep1*** показал наибольшую изменчивость промоторной области (81,1% генотипов отличались от дикого типа) при высокой консервативности белка. Выявленная в промоторной области делеция 9 пн, ассоциированная с уменьшением размера семян, обнаружена только у 20,8% генотипов, что может свидетельствовать об отборе, направленном на увеличение урожайности.

Высокий полиморфизм промоторных областей при консервативности белковых продуктов большинства из изученных генов указывает на преимущественно регуляторные механизмы, которые могут быть задействованы в контроле признака высоты растений у культурного ячменя. Таким образом, полученные результаты расширяют представления о полиморфизме промоторных и кодирующих участков основных генов короткостебельности ячменя и создают основу для целенаправленного использования выявленных мутаций и гаплотипов в научных исследованиях и селекционных программах.

Литература / References

Bélanger S., Gauthier M., Jean M., Sato K., Belzile F.J. Genomic characterization of the *Hordeum vulgare DEP1* (*HvDEP1*) gene and its diversity in a collection of barley accessions. *Euphytica*. 2014;198(1):29-41. DOI: 10.1007/s10681-014-1089-1

Bouma J. New variety of spring barley 'Diamant' in Czechoslovakia. In: H. Stubbe (ed.). *Abhandlungen der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Klasse für Medizin. No. 2. Induzierte Mutationen und ihre Nutzung: Erwin-Baur-Gedächtnisvorlesungen IV, 1966*. Berlin: Akademie-Verlag; 1967. p.177-182.

Chakravorty D., Trusov Y., Zhang W., Acharya B.R., Sheahan M.B., McCurdy D.W. et al. An atypical heterotrimeric G-protein γ-subunit is involved in guard cell K^+-channel regulation and morphological development in *Arabidopsis thaliana*. *The Plant Journal*. 2011;67(5):840-851. DOI: 10.1111/j.1365-313X.2011.04638.x

Chandler P.M., Harding C.A. 'Overgrowth' mutants in barley and wheat: new alleles and phenotypes of the 'Green Revolution' *DELLA* gene. *Journal of Experimental Botany*. 2013;64(6):1603-1613. DOI: 10.1093/jxb/ert022

Chandler P.M., Marion-Poll A., Ellis M., Gubler F. Mutants at the *Slender1* locus of barley cv Himalaya. Molecular and physiological characterization. *Plant Physiology*. 2002;129(1):181-190. DOI: 10.1104/pp.010917

Chandler P.M., Robertson M. Gibberellin dose-response curves and the characterization of dwarf mutants of barley. *Plant Physiology*. 1999;120(2):623-632. DOI: 10.1104/pp.120.2.623

Chen G., Li H., Wei Y., Zheng Y.L., Zhou M., Liu C. Pleiotropic effects of the semi-dwarfing gene *uzu* in barley. *Euphytica*. 2016;209(3):749-755. DOI: 10.1007/s10681-016-1668-4

Chono M., Honda I., Zeniya H., Yoneyama K., Saisho D., Takeda K. et al. A semi-dwarf phenotype of barley uzu results from a nucleotide substitution in the gene encoding a putative brassinosteroid receptor. *Plant Physiology*. 2003;133(3):1209-1219. DOI: 10.1104/pp.103.026195

Dockter C., Gruszka D., Braumann I., Druka A., Druka I., Franckowiak J. Et al. Induced variations in brassinosteroid genes define barley height and sturdiness, and expand the "Green Revolution" genetic toolkit. *Plant Physiology*. 2014;166(4):1912-1927. DOI: 10.1104/pp.114.250738

Dockter C., Hansson M. Improving barley culm robustness for secured crop yield in a changing climate. *Journal of Experimental Botany*. 2015;66(12):3499-3509. DOI: 10.1093/jxb/eru521

EnsemblPlants: [website]. Available from: https://plants.ensembl.org/index.html [accessed Sept. 15, 2025].

Fan C., Xing Y., Mao H., Lu T., Han B., Xu C. et al. GS3, a major QTL for grain length and weight and minor QTL for grain width and thickness in rice, encodes a putative transmembrane protein. *Theoretical and Applied Genetics*. 2006;112(6):1164-1171. DOI: 10.1007/s00122-006-0218-1

Fu X., Richards D.E., Ait-Ali T., Hynes L.W., Ougham H., Peng J. et al. Gibberellin-mediated proteasome-dependent degradation of the barley DELLA protein SLN1 repressor. *The Plant Cell*. 2002;14(12):3191-3200. DOI: 10.1105/tpc.006197

Gao S., Chu C. Gibberellin metabolism and signaling: targets for improving agronomic performance of crops. *Plant and Cell Physiology*. 2020;61(11):1902-1911. DOI: 10.1093/pcp/pcaa104

Haahr V., von Wettstein D. Studies of an induced, high yielding dwarf-mutant of spring barley. In: H. Gaul (ed.). *Barley Genetics III: Proceedings of the 3rd International Barley Genetics Symposium*. Munich: Verlag Karl Thiemig; 1976. p.215-218.

Hausinger R.P. Biochemical diversity of 2-oxoglutarate-dependent oxygenases. In: R.P. Hausinger, C.J. Schofield (eds). *RSC Metallobiology Series No. 32. Oxoglutarate-Dependent Oxygenases*. Cambridge: Royal Society of Chemistry; 2015. p.1-58. DOI: 10.1039/9781782621959-00001

Hedden P. The genes of the Green Revolution. *Trends in Genetics*. 2003;19(1):5-9. DOI: 10.1016/S0168-9525(02)00009-4

HGVS Nomenclature: [website]. Available from: https://hgvs-nomenclature.org [accessed Sept. 15, 2025].

Huang X., Qian Q., Liu Z., Sun H., He S., Luo D. Et al. Natural variation at the *DEP1* locus enhances grain yield in rice. *Nature Genetics*. 2009;41(4):494-497. DOI: 10.1038/ng.352

Ikeda A., Ueguchi-Tanaka M., Sonoda Y., Kitano H., Koshioka M., Futsuhara Y. et al. slender rice, a constitutive gibberellin response mutant, is caused by a null mutation of the *SLR1* gene, an ortholog of the height-regulating gene *GAI/RGA/RHT/D8*. *The Plant Cell*. 2001;13(5):999-1010. DOI: 10.1105/tpc.13.5.999

InterPro. Classification of protein families: [website]. Available from: https://www.ebi.ac.uk/interpro [accessed Sept. 15, 2025].

Jayakodi M., Lu Q., Pidon H., Rabanus-Wallace M.T., Bayer M., Lux T. et al. Structural variation in the pangenome of wild and domesticated barley. *Nature*. 2024;636(8043):654-662. DOI: 10.1038/s41586-024-08187-1

Jayakodi M., Padmarasu S., Haberer G., Bonthala V.S., Gundlach H., Monat C. et al. The barley pan-genome reveals the hidden legacy of mutation breeding. *Nature*. 2020;588(7837):284-289 DOI: 10.1038/s41586-020-2947-8

Jia Q., Li C., Shang Y., Zhu J., Hua W., Wang J. et al. Molecular characterization and functional analysis of barley semi-dwarf mutant Riso no. 9265. *BMC Genomics*. 2015;16:927. DOI: 10.1186/s12864-015-2116-x

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

Jiang C., Lei M., Guo Y., Gao G., Shi L., Jin Y. et al. A reference-guided TILLING by amplicon-sequencing platform supports forward and reverse genetics in barley. *Plant Communications*. 2022;3(4):100317. DOI: 10.1016/j.xplc.2022.100317

Kovrigina L.N., Zaushintsena A.V. Sources of summer barley resistance to lodging. *The Bulletin of KrasGAU.* 2010;1(40):57-62. [in Russian] (Ковригина Л.Н., Заушинцена А.В. Источники устойчивости ярового ячменя к полеганию. *Вестник КрасГАУ*. 2010;1(40):57-62).

Kuczyńska A., Mikołajczak K., Ćwiek H. Pleiotropic effects of the *sdw1* locus in barley populations representing different rounds of recombination. *Electronic Journal of Biotechnology*. 2014;17(5):217-223. DOI: 10.1016/j.ejbt.2014.07.005

Kuczyńska A., Surma M., Adamski T., Mikołajczak K., Krystkowiak K., Ogrodowicz P. Effects of the semi-dwarfing *sdw1/denso* gene in barley. *Journal of Applied Genetics*. 2013;54(4):381-390. DOI: 10.1007/s13353-013-0165-x

Li A., Yang W., Lou X., Liu D., Sun J., Guo X. et al. Novel natural allelic variations at the *Rht-1* loci in wheat. *Journal of Integrative Plant Biology*. 2013;55(11):1026-1037. DOI: 10.1111/jipb.12103

Li S., Liu W., Zhang X., Liu Y., Li N., Li Y. Roles of the *Arabidopsis* G protein γ subunit AGG3 and its rice homologs GS3 and DEP1 in seed and organ size control. *Plant Signaling and Behavior*. 2012;7(10):1357-1359. DOI: 10.4161/psb.21620

Lou X., Li X., Li A., Pu M., Shoaib M., Liu D. et al. The 160 bp insertion in the promoter of *Rht-B1i* plays a vital role in increasing wheat height. *Frontiers in Plant Science*. 2016;7:307. DOI: 10.3389/fpls.2016.00307

Lukina K.A., Porotnikov I.V., Antonova O.Yu., Kovaleva O.N. Determination of the allelic composition of the *sdw1/denso* (*HvGA20ox2*), *uzu1* (*HvBRI1*) and *ari-e* (*HvDep1*) genes in spring barley accessions from the VIR collection. *Plants (Basel)*. 2024;*13(3)*:376. DOI: 10.3390/plants13030376

Mao H., Sun S., Yao J., Wang C., Yu S., Xu C. et al. Linking differential domain functions of the GS3 protein to natural variation of grain size in rice. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2010;107(45):19579-19584. DOI: 10.1073/pnas.1014419107

MEGA Software. Molecular Evolutionary Genetics Analysis: [website]. Available from: https://www.megasoftware.net [accessed Sept. 15, 2025].

Mickelson H.R., Rasmusson D.C. Genes for short stature in barley. *Crop Science*. 1994;34(5):1180-1183.

Moriconi J.I., Kotula L., Santa-María G.E., Colmer T.D. Root phenotypes of dwarf and "overgrowth" SLN1 barley mutants, and implications for hypoxic stress tolerance. *Journal of Plant Physiology*. 2019;234-235:60-70. DOI: 10.1016/j.jplph.2019.01.009

Okonechnikov K., Golosova O., Fursov M.; the UGENE team. Unipro UGENE: a unified bioinformatics toolkit. *Bioinformatics*. 2012;28(8):1166-1167. DOI: 10.1093/bioinformatics/bts091

Pakniyat H., Handley L.L., Thomas W.T.B., Connolly T., Macaulay M., Caligari P.D.S. et al. Comparison of shoot dry weight, Na+ content and δ13C values of ari-e and other semi-dwarf barley mutants under salt-stress. *Euphytica*. 1997;94:7-14. DOI: 10.1023/A:1002956802041

Pearce S., Saville R., Vaughan S.P., Chandler P.M., Wilhelm E.P., Sparks C.A. et al. Molecular characterization of *Rht-1* dwarfing genes in hexaploid wheat. *Plant Physiology*. 2011;157(4):1820-1831. DOI: 10.1104/pp.111.183657

Peng J., Richards D.E., Hartley N.M., Murphy G.P., Devos K.M., Flintham J.E. et al. 'Green revolution' genes encode mutant gibberellin response modulators. *Nature*. 1999;400(6741):256-261. DOI: 10.1038/22307

Peres A.L.G.L., Soares J.S., Tavares R.G., Righetto G., Zullo M.A.T., Mandava N.B. et al. Brassinosteroids, the sixth class of phytohormones: a molecular view from the discovery to hormonal interactions in plant development and stress adaptation. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019;20(2):331. DOI: 10.3390/ijms20020331

Saisho D., Tanno K.I., Chono M., Honda I., Kitano H., Takeda K. Spontaneous brassinolide-insensitive barley mutants '*uzu*' adapted to East Asia. *Breeding Science*. 2004;54(4):409-416. DOI: 10.1270/jsbbs.54.409

Sakamoto T., Miura K., Itoh H., Tatsumi T., Ueguchi-Tanaka M., Ishiyama K. et al. An overview of gibberellin metabolism enzyme genes and their related mutants in rice. *Plant Physiology*. 2004;134(4):1642-1653. DOI: 10.1104/pp.103.033696

Shiu S.H., Bleecker A.B. Plant receptor-like kinase gene family: diversity, function, and signaling. *Science's STKE: Signal Transduction Knowledge Environment*. 2001;2001(113):re22. DOI: 10.1126/stke.2001.113.re22

Sigurbjornsson B., Micke A. Progress in mutation breeding. In: *Induced Mutation in Plants. Proceedings Symposium, Pullman, IAEA*. Vienna: IAEA; 1969. p.673-698.

Singh A.P., Savaldi-Goldstein S. Growth control: brassinosteroid activity gets context. *Journal of Experimental Botany*. 2015;66(4):1123-1132. DOI: 10.1093/jxb/erv026

Sun S., Wang L., Mao H., Shao L., Li X., Xiao J. et al. A G-protein pathway determines grain size in rice. *Nature Communications*. 2018;9(1):851. DOI: 10.1038/s41467-018-03141-y

Teplyakova S., Lebedeva M., Ivanova N., Horeva V., Voytsutskaya N., Kovaleva O. et al. Impact of the 7-bp deletion in *HvGA20ox2* gene on agronomic important traits in barley (*Hordeum vulgare* L.). *BMC Plant Biology*. 2017;17 Suppl 1:99-108. DOI: 10.1186/s12870-017-1121-4

Thomas S.G. Novel *Rht-1* dwarfing genes: tools for wheat breeding and dissecting the function of DELLA proteins. *Journal of Experimental Botany*. 2017;68(3):354-358. DOI: 10.1093/jxb/erw509

Thomas S.G., Blázquez M.A., Alabadí D. Della proteins: master regulators of gibberellin-responsive growth and development. In: P. Hedden, S.G. Thomas (eds). *Annual Plant Reviews. Vol. 49. The Gibberellins*. Oxford: John Wiley & Sons, Ltd.; 2016. p.189-228. DOI: 10.1002/9781119210436.ch7

Urano D., Chen J.G., Botella J.R., Jones A.M. Heterotrimeric G protein signalling in the plant kingdom. *Open Biology*. 2013;3(3):120186. DOI: 10.1098/rsob.120186

Watt C., Zhou G., Angessa T.T., Moody D., Li C. A novel polymorphism in the 5′ UTR of *HvDEP1* is associated with grain length and 1000-grain weight in barley (*Hordeum vulgare*). *Crop and Pasture Science*. 2020;71(8):752-759. DOI: 10.1071/CP20169

Wendt T., Holme I., Dockter C., Preuss A., Thomas W., Druka A. et al. *HvDep1* is a positive regulator of culm elongation and grain size in barley and impacts yield in an environment-dependent manner. *PLoS One*. 2016;11(12):e0168924. DOI: 10.1371/journal. pone.0168924

Xie S., Wang F., Li M., Hu Z., Wang H., Zhang Z. et al. Enhancing barley yield potential and germination rate: gene editing of *HvGA20ox2* and discovery of novel allele *sdw1. ZU9*. *The Plant Journal: for Cell and Molecular Biology*. 2024;119(2):814-827. DOI: 10.1111/tpj.16798

Xu Y., Jia Q., Zhou G., Zhang X.Q., Angessa T., Broughton S. et al. Characterization of the *sdw1* semi-dwarf gene in barley. *BMC Plant Biology*. 2017;17(1):11. DOI: 10.1186/s12870-016-0964-4

Zada A., Lv M., Li J. Molecular lesions in *BRI1* and its orthologs in the plant kingdom. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024;25(15):8111. DOI: 10.3390/ijms25158111

Информация об авторах

Игорь Вадимович Поротников, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, i.v.porotnikov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-5841-8803

Ксения Андреевна Лукина, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, k.lukina@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0001-5477-8684

Ольга Юрьевна Антонова, 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, olgaant326@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8334-8069

Ольга Николаевна Ковалева, 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, o.kovaleva@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-3990-6526

Information about the authors

Igor V. Porotnikov, Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, i.v.porotnikov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-5841-8803

Kseniia A. Lukina, Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, k.lukina@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0001-5477-8684

Olga Yu. Antonova, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, olgaant326@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8334-8069

Olga N. Kovaleva, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, o.kovaleva@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-3990-6526

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 15.10.2025; одобрена после рецензирования 01.12.2025; принята к публикации 26.01.2026.
The article was submitted on 15.10.2025; approved after reviewing on 01.12.2025; accepted for publication on 26.01.2026.

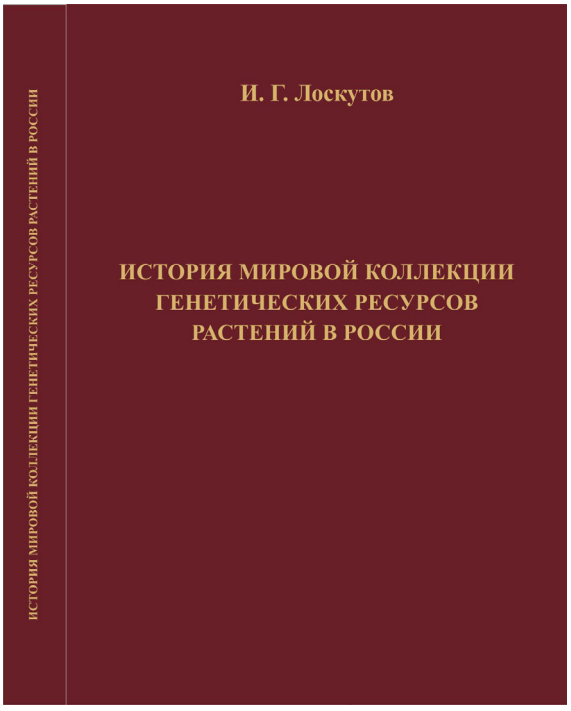
ИСТОРИЯ АГРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ВИР. СЛАВНЫЕ ИМЕНА
HISTORY OF AGROBIOLOGICAL RESEARCH AND VIR. NAMES OF RENOWN

Лучшие книги ВИР 2025 года / VIR's Best Books of 2025



Соратники Николая Ивановича Вавилова : исследователи генофонда растений / под общей редакцией Е. К. Хлесткиной ; Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова. – 3-е изд., пересмотр. – Санкт-Петербург : ВИР, 2025. – 594 с. : портр. – ISBN 978-5-907780-16-3

Nikolai Ivanovich Vavilov's Associates : Plant Genetic Diversity Researchers / E. K. Khlestkina (ed.) ; N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources. 3nd edition, signifi cantly revised and supplemented. – St. Petersburg : VIR, 2025. – 594 p.: ill. – ISBN 978-5-907780-16-3



Лоскутов, Игорь Градиславович. История мировой коллекции генетических ресурсов растений в России / И. Г. Лоскутов ; под общей редакцией Е. К. Хлесткиной ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР) [и др.]. – 2-е изд., испр. и доп. – Санкт-Петербург : ВИР, 2025. – 476 с. : табл. – ISBN 978-5-907780-18-7

Loskutov, I. G. The history of the global collection of plant genetic resources in Russia / I. G. Loskutov ; under the general editorship of E. K. Khlestkina ; Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Russian Academy of Sciences, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources [et all]. – St. Petersburg : VIR, 2025. – 476 p. : tab. – ISBN 978-5-907780-18-7

**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 26.03.2026.
Дата выхода в свет 30.03.2026.
Формат 70×100$^{1}/_{8}$.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Печ. л. 34,75. Тираж 100 экз. Заказ № 389/1.

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-КОПИ»
Адрес: 190121, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. Муниципальный Округ Коломна,
пер. Дровяной, д. 5, литера А, помещ. 1-Н