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

ТРУДЫ ПО ПРИКЛАДНОЙ БОТАНИКЕ, ГЕНЕТИКЕ И СЕЛЕКЦИИ, том 187

выпуск 2

(основаны Р. Э. Регелем в 1908 г.)

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2026

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

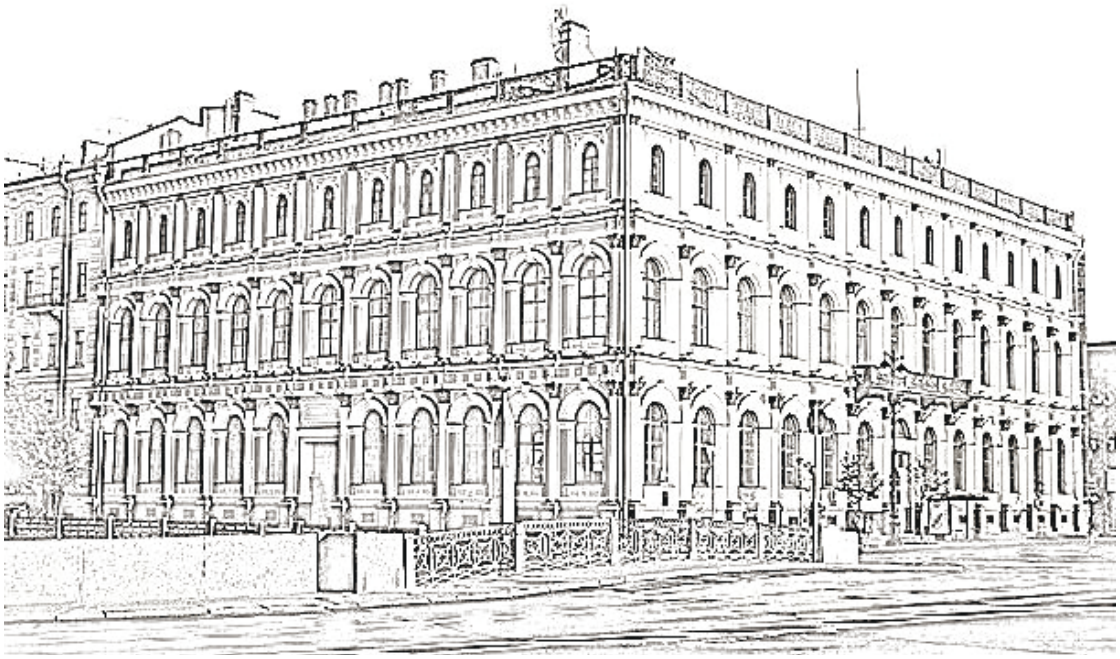
issue 2

(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 2

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2
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, 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

2026 Volume 187 issue 2

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2
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), 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, 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. 2. 254 с.

Охарактеризованы генетические ресурсы подсолнечника в коллекции ВИР. Проведено генотипирование старых отечественных сортов картофеля, сохраняемых на Полярной опытной станции ВИР. Приведена типологическая характеристика и оценена продуктивность луговых экосистем УНПУ «Оёкское» Предбайкалья. Предложены селекционные модели сортов ежевики для средней полосы России в связи с различной морозостойкостью и габитусом растений. Показана динамика накопления и деградации пигментов столовой свеклы (*Beta vulgaris* L.) в течение длительного хранения. Дана оценка качеству муки диплоидных и тетраплоидных образцов кукурузы. Установлено содержание хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов в листьях коллекционных генотипов кунжута (*Sesamum indicum* L.) в условиях Ташкентской области Республики Узбекистан. Разработан протокол регенерации растений овощного гороха в культуре *in vitro*. Исследованы особенности латентного периода *Iris pallasii* Fisch. ex Trevir. (Iridaceae). Проанализированы геномные районы сои, ассоциированные со сроками цветения. Рассмотрена генетическая защита образцов ячменя из Афганистана от обыкновенной злаковой тли. Описано наследование основных хозяйственно ценных признаков гибридами F_1 овса в условиях Северного Зауралья. Изучена модификационная изменчивость содержания основных жирных кислот в семенах высокостеариновых линий подсолнечника в различных условиях выращивания. Выявлены аллельные варианты гена *ZDS* у сортов и перспективных линий яровой твердой пшеницы (*Triticum durum* Desf.) саратовской селекции. Обсуждено влияние условий отбора на результативность селекции яровой мягкой пшеницы. Определены цитогенетические особенности рекомбинантных линий, полученных от необычного растения, найденного в посеве мягкой пшеницы 'ТАМ 200'. Проведена разработка мультиплексных систем SSR-маркеров сои (*Glycine max* (L.) Merr.) для паспортизации и идентификации сортов. Проанализированы экологические и ценотические характеристики *Humulus lupulus* L. на юге Западной Сибири. Пополнена активная коллекция ВИР для селекции яровой мягкой пшеницы в Центрально-Черноземной зоне России. Выполнен анализ *in silico* геномных районов сои, ассоциированных с содержанием белка в семенах. Дана оценка селекционной ценности образцов малораспространенных семечковых культур в генофонде Крымской опытно-селекционной станции ВИР. Представлен обзор генетико-методологические аспектов изучения морозоустойчивости озимой пшеницы за последние двадцать лет.

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, 2026

Editors in charge of this issue: *Elena K. Khlestkina*, Dr. Sci. (Biology), 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. 2. 254 p.

Sunflower genetic resources held in the VIR collection are characterized. Old potato cultivars, preserved at the Polar Experiment Station of VIR, have been genotyped. Typological characterization and productivity assessment have been made for meadow ecosystems in the Oyokskoe Educational, Research and Production Farm, Cis-Baikal region. Breeding models of blackberry cultivars with different winter hardiness and plant habits are offered for central Russia. Dynamics of table beet (*Beta vulgaris* L.) pigment accumulation and degradation during long-term storage are shown. The quality of flour from diploid and tetraploid maize accessions has been assessed. The content of chlorophyll *a* and *b*, and carotenoid content have been measured in the leaves of sesame (*Sesamum indicum* L.) collection genotypes under the conditions of Tashkent Region, Republic of Uzbekistan. An *in vitro* regeneration protocol has been developed for vegetable pea plants. Specific features of the latent period have been studied in *Iris pallasii* Fisch. ex Trevir. (Iridaceae). Genomic regions associated with flowering dates have been analyzed in soybean. Genetic protection from greenbug has been investigated in barley accessions from Afghanistan. Inheritance of basic agronomic traits is described for F_1 hybrids of oat (*Avena sativa* L.) under the conditions of the Northern Trans-Urals. High-stearic sunflower lines have been tested under different growing conditions for phenotypic plasticity of essential fatty acid content in their seeds. Allelic variants of the *ZDS* gene have been identified in cultivars and promising lines of spring durum wheat (*Triticum durum* Desf.) developed in Saratov. The effect of initial selection conditions on the results of spring bread wheat breeding is discussed. Recombinant lines, derived from a single unusual plant found in a field sown with bread wheat 'TAM 200', are analyzed cytogenetically for breeding purposes. Multiplex SSR marker systems have been developed for soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) to facilitate certification and identification of its cultivars. Environmental and cenotic characteristics of *Humulus lupulus* L. in the south of Western Siberia have been analyzed. The active collection of spring bread wheat at VIR has been expanded to meet the breeding needs in the Central Black Earth Region of Russia. Genomic regions associated with seed protein content in soybean have been examined *in silico.* Nontraditional pome fruit cultivars and accessions maintained at Krymsk Experiment Breeding Station of VIR have been evaluated for breeding purposes. Genetic and methodological aspects of studying frost resistance in winter wheat over the past two decades are reviewed.

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

МОБИЛИЗАЦИЯ И СОХРАНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Гаврилова В.А., Макарова Л.Г., Анисимова И.Н.
Генетические ресурсы подсолнечника в коллекции ВИР 9

Рыбаков Д.А., Антонова О.Ю., Травина С.Н., Косарева О.С., Гавриленко Т.А.
Генотипирование старых отечественных сортов картофеля, сохраняемых на Полярной опытной станции ВИР 21

Худоногова Е.Г., Половинкина С.В.
Типологическая характеристика и продуктивность луговых экосистем УНПУ «Оёкское» Предбайкалья 35

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Грюнер Л.А.
Селекционные модели сортов ежевики для средней полосы России в связи с различной морозостойкостью и габитусом растений 47

Зарецкий А.М., Соколова Д.В., Соловьева А.Е.
Мониторинг динамики содержания беталаинов столовой свеклы (*Beta vulgaris* L.) в течение длительного хранения 58

Кибкало И.А., Хатефов Э.Б.
Технологическая оценка качества муки диплоидных и тетраплоидных образцов кукурузы 69

Пирназаров Е.Б., Аманов Б.Х.
Содержание хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов в листьях коллекционных генотипов кунжута (*Sesamum indicum* L.) в условиях Ташкентской области Республики Узбекистан 83

Путина О.В., Рахмангулов Р.С., Поливара Н.В., Коваленко Н.Н., Ухатова Ю.В., Хлесткина Е.К.
Регенерация растений овощного гороха в культуре *in vitro* 92

Рамазанова М.С., Ткаченко К.Г., Гемеджиева Н.Г., Староверов Н.Е., Грязнов А.Ю., Арысбаева Р.Б.
Особенности латентного периода *Iris pallasii* Fisch. ex Trevir. (Iridaceae) 105

ГЕНЕТИКА КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Меньков М.Т., Сеферова И.В., Лепилова Е.А., Швачко Н.А., Бойко А.П., Хлесткина Е.К., Розанова И.В.
Геномные районы сои, ассоциированные со сроками цветения 114

Радченко Е.Е., Ковалева О.Н., Абдуллаев Р.А.
Генетическая защита образцов ячменя из Афганистана от обыкновенной злаковой тли 128

Таутекенова А.К., Боме Н.А.
Наследование основных хозяйственно ценных признаков гибридами F_1 овса в условиях Северного Зауралья 137

Чебанова Ю.В., Демурин Я.Н., Киров И.В.
Модификационная изменчивость содержания основных жирных кислот в семенах высокостеариновых линий подсолнечника в различных условиях выращивания 148

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ СЕЛЕКЦИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Гапонов С.Н., Шутарева Г.И., Цетва Н.М., Цетва И.С., Милованов И.В., Жиганова Е.С., Соловова Н.С., Бурмистров Н.А., Ткаченко О.В., Костина Е.Е., Борисов И.В.
Выявление аллельных вариантов гена *ZDS* у сортов и перспективных линий яровой твердой пшеницы (*Triticum durum* Desf.) саратовской селекции 158

Лепехов С.Б.
Влияние условий отбора на результативность селекции яровой мягкой пшеницы 168

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

Митрофанова О.П., Хакимова А.Г., Пендинен Г.И., Яковлева О.В., Лосева В.А.
Рекомбинантные линии, производные одного необычного растения, найденного в посеве мягкой пшеницы 'ТАМ 200', как исходный материал для селекции 178

Савиченко В.Г.
Разработка мультиплексных систем SSR-маркеров сои (*Glycine max* (L.) Merr.) для паспортизации и идентификации сортов 193

СИСТЕМАТИКА, ФИЛОГЕНИЯ И ГЕОГРАФИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Овчарова Н.В., Чупина И.С., Силантьева М.М., Мироненко О.Н.
Диапазон экологических и ценотических характеристик *Humulus lupulus* L. на юге Западной Сибири 207

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Лосева В.А., Брыкова А.Н., Зуев Е.В.
Пополнение активной коллекции ВИР для селекции яровой мягкой пшеницы в Центрально-Черноземной зоне России 217

Розанова И.В., Климова П.В., Евлаш А.Я., Сеферова И.В.
Анализ *in silico* геномных районов сои, ассоциированных с содержанием белка в семенах 226

Чепинога И.С., Тихонова А.В.
Селекционная ценность сортообразцов малораспространенных семечковых культур в генофонде Крымской опытно-селекционной станции ВИР 235

ОБЗОРЫ

Федяева А.В.
Генетико-методологические аспекты изучения морозоустойчивости озимой пшеницы 243

ИСТОРИЯ АГРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ВИР. СЛАВНЫЕ ИМЕНА

Юбилейные сборники ВИР 2025 года 253

CONTENTS

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

Gavrilova V.A., Makarova L.G., Anisimova I.N.
Sunflower genetic resources in the VIR collection 9

Rybakov D.A., Antonova O.Yu., Travina S.N., Kosareva O.S., Gavrilenko T.A.
Genotyping of old potato cultivars preserved at the Polar Experiment Station of VIR 21

Khudonogova E.G., Polovinkina S.V.
Typological characteristics and productivity of meadow ecosystems in the Oyokskoe Educational, Research and Production Farm, Cis-Baikal region 35

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Gruner L.A.
Breeding models of blackberry cultivars for central Russia in connection with different winter hardiness and plant habits 47

Zaretsky A.M., Sokolova D.V., Solovyeva A.E.
Monitoring of the betalain content dynamics in table beet (*Beta vulgaris* L.) during long-term storage 58

Kibkalo I.A., Khatefov E.B.
Technological assessment of the quality of flour from diploid and tetraploid maize accessions 69

Pirnazarov E.B., Amanov B.Kh.
Chlorophyll *a* and *b* and carotenoid content in the leaves of sesame (*Sesamum indicum* L.) collection genotypes under the conditions of Tashkent Region, Republic of Uzbekistan 83

Putina O.V., Rakhmangulov R.S., Polivara N.V., Kovalenko N.N., Ukhatova Yu.V., Khlestkina E.K.
In vitro regeneration of vegetable pea plants 92

Ramazanova M.S., Tkachenko K.G., Gemejiyeva N.G., Staroverov N.E., Gryaznov A.Yu., Arysbaeva R.B.
Latent period characteristics of *Iris pallasii* Fisch. ex Trevir. (Iridaceae) 105

GENETICS OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Menkov M.T., Seferova I.V., Lepilova E.A., Shvachko N.A., Boyko A.P., Khlestkina E.K., Rozanova I.V.
Genomic regions associated with flowering dates in soybean 114

Radchenko E.E., Kovaleva O.N., Abdullaev R.A.
Genetic protection of Afghan barley accessions from greenbug 128

Tautekenova A.K., Bome N.A.
Inheritance of basic agronomic traits by F_1 hybrids of oat (*Avena sativa* L.) under the conditions of the Northern Trans-Urals 137

Chebanova Yu.V., Demurin Ya.N., Kirov I.V.
Phenotypic plasticity of essential fatty acid content in seeds of high-stearic sunflower lines under different growing conditions 148

DOMESTIC PLANT BREEDING AT THE PRESENT STAGE

Gaponov S.N., Shutareva G.I., Tsetva N.M., Tsetva I.S., Milovanov I.V., Zhiganova E.S., Solovova N.S., Burmistrov N.A., Tkachenko O.V., Kostina E.E., Borisov I.V.
Identification of allelic variants of the *ZDS* gene in cultivars and promising lines of spring durum wheat (*Triticum durum* Desf.) developed in Saratov 158

Lepekhov S.B.
The effect of initial selection conditions on the breeding results in spring bread wheat 168

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

Mitrofanova O.P., Khakimova A.G., Pendinen G.I., Yakovleva O.V., Loseva V.A.
Recombinant lines, derived from a single unusual plant found in a field sown with bread wheat 'TAM 200', as source material for breeding 178

Savichenko V.G.
Development of multiplex SSR marker systems of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) for certification and identification of cultivars 193

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

Ovcharova N.V., Chupina I.S., Silantyeva M.M., Mironenko O.N.
The range of environmental and cenotic characteristics of *Humulus lupulus* L. in the south of Western Siberia 207

BRIEF REPORTS

Loseva V.A., Brykova A.N., Zuev E.V.
Expansion of the active collection of spring bread wheat at VIR for breeding in the Central Black Earth Region of Russia 217

Rozanova I.V., Klimova P.V., Evlash A.Ya., Seferova I.V.
In silico analysis of soybean genomic regions associated with seed protein content 226

Chepinoga I.S., Tikhonova A.V.
Breeding value of nontraditional pome fruit cultivars and accessions maintained at Krymsk Experiment Breeding Station of VIR 235

SURVEYS

Fedyaeva A.V.
Genetic and methodological aspects of studying frost resistance in winter wheat 243

HISTORY OF AGROBIOLOGICAL RESEARCH AND VIR. NAMES OF RENOWN

2025 anniversary publications by VIR 253

МОБИЛИЗАЦИЯ И СОХРАНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Обзорная статья
УДК 633.521;633.854;575.1
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o9

(cc) BY

Генетические ресурсы подсолнечника в коллекции ВИР

В. А. Гаврилова, Л. Г. Макарова, И. Н. Анисимова

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

Автор, ответственный за переписку: Вера Алексеевна Гаврилова, v.gavrilova@vir.nw.ru

Самая крупная коллекция подсолнечника хранится в генбанке США. Однако, поскольку Американский континент является центром происхождения однолетних и многолетних дикорастущих видов *Helianthus* L., две трети американской коллекции составляют образцы диких видов, собранные в Северной и Центральной Америке. На втором месте по численности находится коллекция культурного подсолнечника генбанка Франции. В коллекции ВИР всего лишь 431 образец дикорастущих видов, тогда как коллекция культурного подсолнечника (2306 образцов) самая богатая по разнообразию генотипов и оригинальная – по численности образцов она занимает третье место в мире. Здесь сосредоточены первые сорта народной селекции и первые сорта селекционных учреждений, так как именно в России происходил процесс становления культуры подсолнечника. Высокомасличные сорта ‘Передовик’, ‘Смена’, ‘Спутник’ и другие лежат в основе первых американских линий для гетерозисной селекции. Отечественные сорта обладают устойчивостью к заразихе, ржавчине, ложной мучнистой росе и подсолнечниковой моли. Материалы экспедиций в Молдавии, Украине, Центральной России и Приморском крае, проведенных в 60–80-е годы прошлого столетия, также ценны и оригинальны. Работа по изучению коллекции ведется в соответствии с основными направлениями селекции. В результате многолетних исследований созданы выборки образцов – признаковые коллекции высокомасличных и высокобелковых, крупноплодных, высокорослых, устойчивых к различным патогенам образцов. Для селекции подсолнечника с использованием эффекта гетерозиса получены линии короткостебельные, с цитоплазматической мужской стерильностью и линии – восстановители фертильности пыльцы.

Ключевые слова: *Helianthus*, линии, сорта-популяции, образцы, дикие виды, генбанки, признаковые коллекции

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту № FGEM-2022-0005 «Растительные ресурсы масличных и прядильных культур ВИР как основа теоретических исследований и их практического использования».

Для цитирования: Гаврилова В.А., Макарова Л.Г., Анисимова И.Н. Генетические ресурсы подсолнечника в коллекции ВИР. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(2):9-20. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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.

© Гаврилова В.А., Макарова Л.Г., Анисимова И.Н., 2026

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

Review article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o9

Sunflower genetic resources in the VIR collection

Vera A. Gavrilova, Larisa G. Makarova, Irina N. Anisimova

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

Corresponding author: Vera A. Gavrilova, v.gavrilova@vir.nw.ru

The largest collection of sunflower genetic resources is held by the National Plant Germplasm System of the United States. However, since the American continent is the center of origin for annual and perennial wild *Helianthus* L. spp., two-thirds of the U.S. collection comprises wild accessions collected in North and Central Americas. The second-largest collection of cultivated sunflower belongs to the French genebank. The richest and truly unique collection in terms of genotype diversity is maintained at VIR, Russia. It harbors 2,306 accessions, which makes it third in the world. The first landraces and earliest cultivars developed at plant breeding institutions are concentrated here, since it was in Russia that sunflower crop cultivation was established. High-oleic cultivars, such as 'Peredovik', 'Smena', 'Sputnik', etc., served as initial sources for the first American lines for heterosis breeding. Domestic cultivars are resistant to broomrape, rust, downy mildew, and sunflower moth. The germplasm delivered by collecting missions from Moldova, Ukraine, Central Russia, and Primorsky Territory in the 1960–1980s is also valuable and unique. The collection has been studied by researchers in line with principal breeding trends. Long-term research activities have resulted in setting up trait-specific collections of high-oleic, high-protein, large-fruited, tall-growing, and pathogen-resistant accessions. Short-stemmed and CMS lines, as well as pollen fertility restorers, have been developed for sunflower heterosis breeding.

Keywords: *Helianthus*, lines, cultivar populations, accessions, wild species, genebanks, trait-specific collections

Acknowledgments: the research was performed within the framework of the state task according to the theme plan of VIR, Project No. FGEM-2022-0005 "Plant resources of oil and fiber crops at VIR as the basis for theoretical research and their practical utilization".

For citation: Gavrilova V.A., Makarova L.G., Anisimova I.N. Sunflower genetic resources in the VIR collection. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(2):9-20. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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

Н. И. Вавилов считал важным собирать мировые растительные ресурсы, сохранять их, изучать и использовать в практической селекционной работе для создания устойчивого земледелия, которое как можно меньше зависело бы от господства стихий и случайностей погоды (Vavilov, 1965). Генетические ресурсы служат основой для поиска перспективных комбинаций признаков, новых аллелей генов и создания сортов с заданными свойствами (Bazanov et al., 2023). Необходимость сохранения генетических ресурсов обусловлена следующими причинами: деградацией окружающей среды (вырубка лесов, опустынивание, химизация почв); стихийными бедствиями (засухи, наводнения, землетрясения, пожары); деятельностью селекционно-семеноводческих фирм (унификация сортов, вытеснение местного агробиоразнообразия, «терминаторские технологии», среди которых главное место занимает селекция на устойчивость к гербицидам); индустриализацией и урбанизацией (миграция населения, интенсификация сельского хозяйства, широкомасштабное строительство); локальными войнами и межнациональными конфликтами (уничтожение агроэкосистем, разорение местных фермеров, разрушение местных генбанков) (Aleksanian, 2002). Подсолнечник однолетний *Helianthus annuus* L. – ценная масличная культура, занимающая четвертое место в мире среди масличных растений и основная в Российской Федерации, возделывается на площади 9–10 млн га ежегодно (9,4 млн га – в 2021 г.; 10,1 млн га – в 2022 г.; 9,9 млн га – в 2023 г.; 9,8 млн га – в 2024 г. и 9,6 млн га – в 2025 г.) (Ruseed, 2025). Существенные прибавки урожайности обеспечиваются промышленными гибридами. По оценкам сайта «Агротренд», сбор семян подсолнечника в мире в 2025 г. составил 55,1 млн тонн (Global sunflower production…, 2025), а в РФ – 18,3 млн тонн (International Grains Council, 2025).

История формирования коллекции

В Федеральном исследовательском центре Всероссийском институте генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР)[1] начиная с 1922 г. создана, сохраняется и поддерживается в живом состоянии коллекция генетических ресурсов подсолнечника. Это старейшая коллекция подсолнечника в мире (табл. 1). Следующие по старшинству коллекции подсолнечника созданы в 1946 г. в Германии и в 1948 г. в США и Аргентине (Terzić et al., 2020). Дикие виды рода *Helianthus* L. произрастают только в Северной и Центральной Америке на территории Канады, США и Мексики. Иногда они встречаются в Южной Америке. Существует постоянная необходимость в сборе, поддержании и оценке дикорастущего генофонда *Helianthus* для улучшения культивируемого подсолнечника. Экспедиции по сбору диких видов проводились неоднократно, начиная с 1951 г. (Hu et al., 2010). Последние несколько экспедиций предприняты под руководством сотрудника Лаборатории северных культур США в Фарго (Northern Crop Science Laboratory, Fargo, USA) Дж. Сейлера (Seiler, 1992; Seiler, Rieseberg, 1997; Seiler et al., 2023). Самая большая коллекция диких видов подсолнечника собрана в генбанке США: она включает 1057 образцов – представителей 53 видов. Образцы диких видов содержатся также в коллекциях подсолнечника Сербии, Болгарии, Германии, Румынии, Франции, Украины (Terzić et al., 2020).

Первые образцы культурного подсолнечника, внесенные в постоянный каталог ВИР, получены из США. Они поступили в СССР, а затем в ВИР благодаря деятельности Нью-Йоркского бюро по прикладной ботанике (впоследствии – Сельскохозяйственное бюро), которое было организовано при непосредственном участии Н. И. Вавилова и существовало в США с 1921 по 1927 г. под руководством Д. Н. Бородина (Truskinov, 2012). Следующими в коллекцию внесены стародавние сорта-популяции народной селекции и сорта, выведенные в различных селекционных учреждениях бывшего Советского Союза начиная с 20-х годов XX столетия. В дальнейшем сборы проводились в разных регионах бывшего СССР: на Алтае, Дальнем Востоке, в Казахстане, Армении, Молдавии. Эти образцы утрачены к настоящему времени в местах их постоянного возделывания.

Пополнение коллекции осуществляется разными способами.

1. Селекционные учреждения страны обязаны предоставлять в коллекцию ВИР семена сортов и линий, оригинаторами которых они являются.

2. По договоренности с селекционерами в коллекцию передается материал, который находился в селекционной разработке, но не был районирован.

3. Экспедиционные сборы до 1991 г. на территории РФ и республик бывшего Советского Союза. Например, большое количество образцов местных популяций было собрано благодаря экспедициям Л. И. Говорова (1923 г.), затем А. В. Анащенко с коллегами (1973–1976 гг.) по Центральной полосе России, в Молдавии и на Украине; М. С. Щенковой в 1928 г. на Дальнем Востоке. Очень интересный материал был получен в коллекцию в результате экспедиции М. В. Кукош в 1982 г. по Приморскому краю.

4. Зарубежные экспедиции сотрудников ВИР. В коллекции сохранены сборы Н. И. Вавилова, проведенные им в 1926 г. в Сирии и в 1931 г. в США. Значительный вклад в пополнение коллекции подсолнечника внесен благодаря экспедициям Е. А. Столетовой в Армению в 1925 г., Н. Н. Кулешова в США в 1930 г., Д. И. Анатасова в Болгарию в 1937 г. и других сотрудников ВИР (Dragavtsev, 1994).

5. Экспедиционные сборы в международных экспедициях в Северной Америке в местах естественного произрастания дикорастущего подсолнечника. Примером служит совместная экспедиция заместителя директора по научной работе Крымской опытно-селекционной станции ВИР А. Н. Лукьяненко и заместителя директора Всесоюзного НИИ масличных культур (ВНИИМК) Н. И. Бочкарева в 1979 г., а также международная экспедиция 1989 г. по сбору дикорастущих видов подсолнечника, участником которой стала В. А. Гаврилова – куратор коллекции подсолнечника ВИР (Bochkarev, 1985; Seiler et al., 1990).

6. В результате обмена с зарубежными селекционными учреждениями и генными банками. Обмен до 2018 г. осуществлялся по договоренности между куратором коллекции ВИР и иностранными научными сотрудниками на паритетной основе, то есть обмену подлежало равное количество образцов.

7. Существуют делектусы (Delectus seminum), которые издают генные банки, многие селекционные учреждения и ботанические сады мира на английском языке. В делектусе представлены списки семян, которые могут

[1] Первое название – Институт прикладной ботаники и новых культур, затем – Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства.

Таблица 1. Коллекции подсолнечника в генных банках мира (Terzić et al., 2020)
Table 1. Sunflower collections in the world's genebanks (Terzić et al., 2020)

Страна / Country	Организация / Institution	Год создания / Year of founding	Количество образцов: / Number of accessions:			
			линий / lines	сортов-популяций / cultivar populations	однолетних дикорастущих видов / wild annual species	многолетних дикорастущих видов / wild perennial species
Аргентина	INTA, Cordoba	1948	414	406	63	–
Болгария	DAI General Toshevo	1970–1980	–	–	125	215
Франция	INRA, Toulouse	1962	2300	403	369	230
Германия	IPK, Gatersleben	1946	167	140	17	35
Индия	ICAR-IIOR	1969	1918	686	447	–
Румыния	NARDI Fundulea	1965	220	430	10	–
Россия	VIR, St. Petersburg	1922	557	202	340	89
Сербия	IFVC, Novi-Sad	1980	–	–	75	332
Испания	INIA, Madrid	1986	–	196	–	–
США	USDA-ARS, Ames, Iowa	1948	2616		636	904

быть предоставлены для обмена. Сотрудники ВИР выписывали семена из делектусов со всех учреждений мира. Эти семена официально поступали в институт через отдел интродукции. ВИР издавал свои делектусы регулярно один раз в пять лет, например «Delectus seminum 2006–2010». Составителями делектуса были все кураторы коллекций. ВИР также высылал семена по иностранным заявкам (Delectus seminum…, 2006).

Состав коллекции подсолнечника

Современная коллекция ВИР насчитывает 2737 образцов, из них 2306 образцов культурного подсолнечника (*H. annuus* L.), 431 образец однолетних (353) и многолетних (78) диких видов (рис. 1, табл. 2). В состав коллекции культурного подсолнечника включены образцы из всех стран мира, возделывающих подсолнечник (в количестве 710), отечественные сорта – 252, что составляет 33% от общего количества, 736 образцов – экспедиционные сборы и 608 – отечественные и зарубежные линии (рис. 2, 3).

Сорта отечественной селекции представлены двумя пулами. Стародавние сорта и местные формы, полученные в результате длительного естественного и искусственного отбора в ходе так называемой «народной селекции», считаются «золотым фондом» коллекций (Zhuchenko, Rozhmina, 2000). Народная селекция началась в России на заре возделывания этой культуры. Первые сведения об этом относятся к 1885 г. (Morozov, 1964). Населением Саратовской и Воронежской губерний было создано большое количество местных крестьянских сортов: зеленок, американок, масленок, пузанков, фуксинок, обладающих бóльшей раннеспелостью по сравнению с исходными фенотипами, доставленными из Европы, однотипностью и рядом других полезных признаков

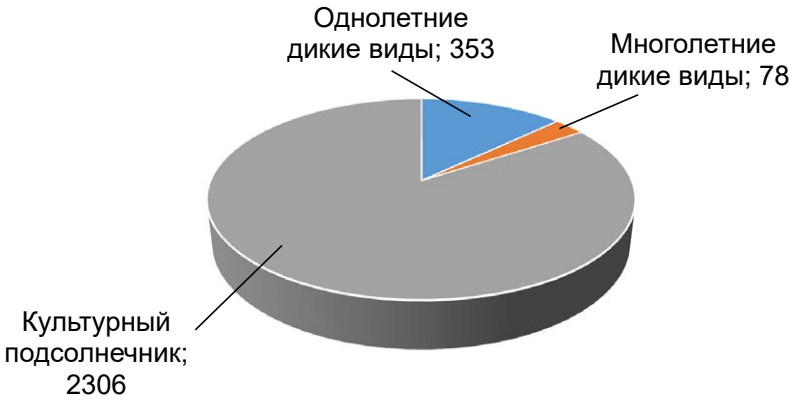


Рис. 1. Состав коллекции подсолнечника ВИР
Fig. 1. Composition of the sunflower collection at VIR

Таблица 2. Состав коллекции дикорастущих видов подсолнечника ВИР, произрастающих в интродукционно-карантинном питомнике Кубанской опытной станции ВИР

Table 2. Composition of VIR's wild sunflower collection: species grown in the introduction and quarantine nursery, Kuban Experiment Station of VIR

Виды / Species	Число образцов / Number of accessions	Виды / Species	Число образцов / Number of accessions
Helianthus annuus L.	340	*H. hirsutus* Raf.	3
H. argophyllus Torr. et A. Gray	3	*H. macrophyllus* Willd.	2
H. bolanderi A. Gray	3	*H. maximillianii* Schrad.	5
H. petiolaris Nutt.	2	*H. microcepallus* Torr. et A. Gray	1
H. praecox Engelm. et A. Gray	2	*H. mollis* Lam.	4
H. debilis Nutt.	3	*H. nuttallii* Torr. et A. Gray	3
H. angustifolius L.	2	*H. occidentalis* Riddell	3
H. californicus DC.	3	*H. rigidus* (Cass.) Desf. (syn. *H. pauciflorus* Nutt.)	7
H. ciliaris DC.	1		
H. decapetalus L.	7	*H. laetiflorus* Pers.	2
H. divaricatus L.	3	*H. salicifolius* Dietr.	4
H. eggertii Small.	1	*H. smithii* Heiser	1
H. floridanus A. Gray ex Chapm.	1	*H. strumosus* L.	3
H. giganteus L.	4	*H. tuberosus* L.	13
H. grosseserratus M. Martens	5	Всего:	431

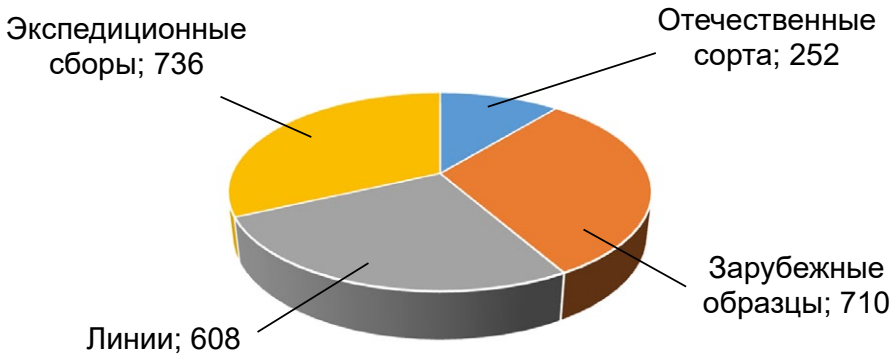


Рис. 2. Распределение образцов коллекции культурного подсолнечника ВИР в соответствии со статусом

Fig. 2. Distribution of cultivated sunflower accessions in the VIR collection according to their status

и хорошо приспособленных к условиям возделывания в данной зоне. Некоторые из этих стародавних сортов сохранены в коллекции ВИР. Другой пул отечественных сортов – это высокомасличные образцы, созданные В. С. Пустовойтом и его соратниками начиная с 30-х годов прошлого столетия (Pustovoit, 1975). У сортов народной селекции содержание масла в семенах составляло 28–30%. Благодаря исследованиям академика В. С. Пустовойта получены сорта с масличностью 55–60%, которые легли в основу мировой селекции подсолнечника.

Зарубежные образцы включают в себя первые гибриды на основе цитоплазматической мужской стерильности (ЦМС). Они сохраняются в качестве гибридных популяций, полученных из тех стран, которые первыми занялись производством гибридного подсолнечника с использованием эффекта гетерозиса (Франция, Венгрия, Румыния, США, Югославия).

Большое количество линий получено из Болгарии (см. рис. 3). Это не только селекционные линии, но и линии, характеризующиеся разнообразием морфологических признаков. Такими же свойствами обладают линии из Италии и Великобритании. Среди молдавских, украинских и армянских образцов присутствуют высокорослые и крупноплодные. Среди образцов, полученных из

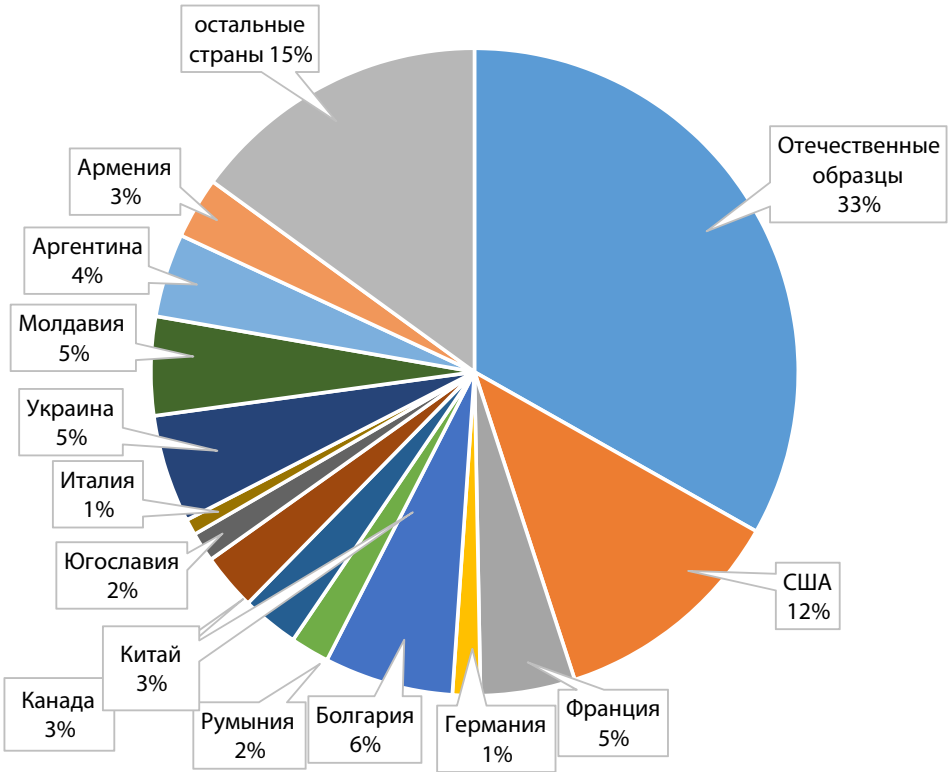


Рис. 3. Состав коллекции культурного подсолнечника ВИР различного географического происхождения
Fig. 3. Composition of VIR's cultivated sunflower collection showing the origin of accessions

Китая, также имеются крупноплодные, но, как показали результаты нашего изучения, в большинстве своем эти образцы гибридного происхождения, и сохранить крупноплодность для них в процессе поддержания не удается. Большим разнообразием отличаются образцы из Аргентины: высокорослые с утолщенным стеблем (с высотой растения до 4 м) и низкорослые (с высотой растения около 60–70 см), отличающиеся по размеру и форме листовой пластинки, размерами и окраской соцветия. Образцы из Венгрии всегда высокорослы, но их стебель не утолщен. Образцы из Канады и США зачастую короткостебельны и опушены. В составе коллекции имеется также линия НА89 (ЦМС и ее фертильный аналог) селекции США, которая многие годы служила стандартом для линейного селекционного материала.

Коллекция ВИР дикорастущих видов включает 24 вида *Helianthus*, из них пять однолетних и 19 многолетних, происхождение которых – Северная Америка, представленных по системе Э. Шиллинга и Ч. Хейзера (Schilling, Heiser, 1981) (см. табл. 2). Это образцы, полученные из генбанков США (г. Эймс, Айова), Югославии (г. Нови Сад), Болгарии (г. Добрич), и образцы, собранные во время международных экспедиций. Дикие виды подсолнечника (многие из них числятся карантинными сорняками на территории РФ) поддерживаются на интродукционно-карантинном питомнике Кубанской опытной станции – филиала ВИР и являются источниками ЦМС, генов восстановления фертильности пыльцы (*Rf*) и генов устойчивости к различным патогенам (Fick, Miller, 1997; Christov, 1999). Образцы однолетних видов регулярно пересеваются. Многолетние виды произрастают на изолированном участке интродукционно-карантинного питомника постоянно, поддерживаются в вегетативном состоянии. Показано, что большинство дикорастущих видов способно вступать в гибридизацию с культурным подсолнечником (Anashchenko, Popova, 1985; Christov, 1996, 1999; Škorić et al., 2012). При дальнейшем самоопылении межвидовых гибридов получают линии для селекционного использования (Gavrilova et al., 2000, 2003).

Основными направлениями современных исследований генетических ресурсов подсолнечника ВИР является, прежде всего, их изучение в соответствии с основными направлениями селекции, выявление скрытого потенциала изменчивости с использованием строгого инцухта, внутривидовой и межвидовой гибридизации.

Со времен Н. И. Вавилова коллекция служила источником селекционного материала. Сотрудники ВИР выполняли заявки на семена подсолнечника всех селекционных учреждений страны на безвозмездной основе в соответствии с заявленными направлениями селекции. Для выполнения заявок существовала программа размножения образцов, ценных для селекционного использования. Изучение и полевое фенотипирование образцов ведется по всем признакам, ценным в селекционном отношении. Проводится также генотипирование и молекулярное маркирование.

Структурирование коллекции по результатам изучения

Исследования генетического разнообразия подсолнечника в полевых и лабораторных условиях, проведенные в течение многих лет, привели к созданию признаковых коллекций, включающих образцы, необходимые для селекции сортов и гибридов определенного назначения (рис. 4). Таким образом сотрудниками ВИР сформированы признаковые коллекции: 80 раннеспелых образцов, на протяжении ряда лет созревающих раньше стандарта на 10–14 дней; 99 образцов, демонстрирующих отсутствие поражения разными патогенами культуры в полевых условиях (Gavrilova, Anisimova, 2025);

83 высокомасличных сорта (с содержанием масла в семенах выше 55%); 39 высокобелковых образцов с содержанием белка в семенах выше 40% (Konarev et al., 1980); 90 образцов крупноплодного подсолнечника с массой 1000 семян выше 90 г (Anashchenko, 1972; Gavrilova et al., 2023); 80 высокорослых образцов с высотой растения свыше 250 см, предназначенных для силосования; а также массив из отечественных и зарубежных линий (см. рис. 4).

Подсолнечник размножается путем перекрестного опыления (Fick, Miller, 1997). Однако аллели автофертильности были выявлены как у культурного *H. annuus* (Plachek, 1930), так и у некоторых дикорастущих видов (Anisimova, 1984; Anashchenko, Popova, 1985). Создание линий путем самоопыления сортов подсолнечника началось в нашей стране в 30-е годы прошлого века (Plachek, 1930). Многие линии были созданы на Кубанской опытной станции ВИР в Краснодарском крае А. В. Анащенко и В. Т. Рожковой (Rozhkova, Anashchenko, 1977), а затем и авторами статьи (Gavrilova et al., 2005; Gavrilova et al., 2017).

Коллекция включает 608 линий (рис. 4, 5), полученных из различных селекционных учреждений нашей и зарубежных стран из перекрестноопыляющихся популяций благодаря многократному строгому самоопылению. Особый интерес представляют линии, созданные из стародавних российских сортов. Примеры таких линий: ВИР158, ВИР 607, ВИР682 из сорта ‘Чернянка’; ВИР140 из сорта ‘Смена’; ВИР138А и ВИР138Б, ВИР155 из сорта ‘Вымпел’; ВИР136, ВИР178, ВИР263, ВИР349, ВИР369 из

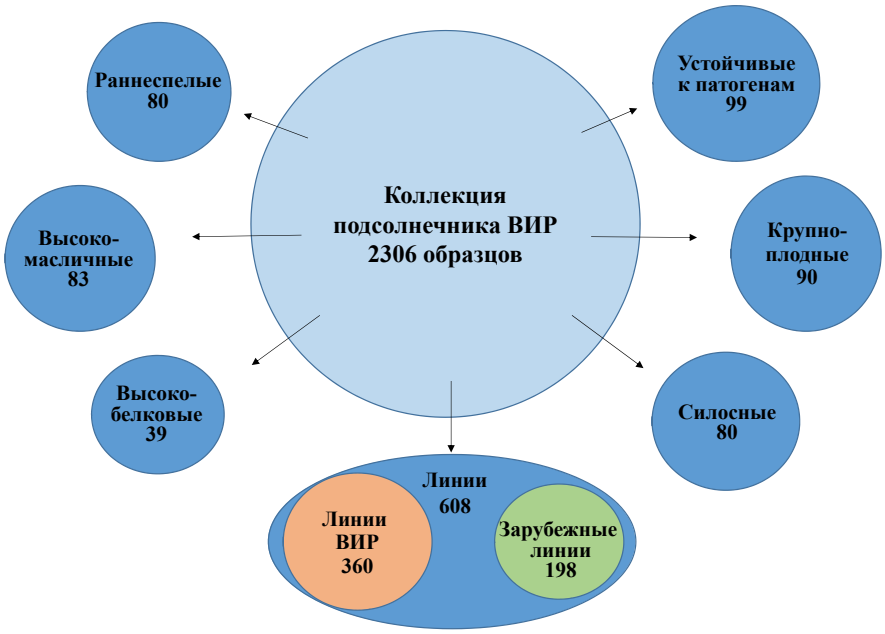


Рис. 4. **Структурирование коллекции подсолнечника ВИР**
Fig. 4. **Structure of the sunflower collection at VIR**

Рис. 5. **Соотношение линейного материала в коллекции подсолнечника ВИР**
Fig. 5. **Grouping of sunflower lines in the VIR collection**

сорта ‘Спутник’ и другие (Anashchenko et al., 1992; Gavrilova et al., 2017; Gavrilova, Anisimova, 2017). Сотрудники ВИР получали линейный материал, подвергая самоопылению также сорта и гибриды, поступившие в коллекцию из зарубежных стран. Всего таких линий 10–29-го поколения инбридинга насчитывается 360; они охватывают максимальное разнообразие подсолнечника (см. рис. 4, 5). В процессе многолетнего поддержания в живом состоянии и изучения культурного подсолнечника коллекции ВИР установлено, что большинство образцов коллекции несет признак способности завязывать семена при самоопылении с той или иной частотой, а значит, открывается возможность создания генетической коллекции.

Генетическая коллекция

Анализ потомств от самоопыления сортов и образцов подсолнечника позволяет выявить все возможные проявления аллелей по каждому морфологическому признаку. Необходимо выделить генотип, сочетающий желаемое проявление признака и аллель автофертильности. Далее следовал длительный процесс инцухта для перевода генов, кодирующих признак, в гомозиготное состояние. Линии, выравненные по всем морфологическим признакам и фазам вегетационного периода на протяжении нескольких поколений, составили генетическую коллекцию. Генетическая коллекция – это совокупность образцов и линий, которые отличаются от условного стандарта «дикого типа» изменением одного или нескольких признаков, включая характеристики кариотипа (Smirnov, 2005; Porokhovinova, Dubovskaya, 2023).

В практическом отношении морфологические признаки с известным генетическим контролем (темно-зеленая и салатная окраска листа, белая окраска семени, изрезанность края листовой пластинки, ее бугорчатость, асимметричность, эректоидная форма черешка, антоциановая окраска) используются в качестве маркеров в гетерозисной селекции при контроле за чистотой линий в процессе их поддержания и семеноводческого размножения для идентификации линий и гибридов. Линии генетической коллекции необходимы для определения генетического контроля признаков путем гибридологического анализа или с помощью молекулярно-генетических подходов.

Анализ генеалогии линий показывает, что на основе определенных высокомасличных сортов, созданных В. С. Пустовойтом, получены не только отечественные линии ВИР и линии Института масличных культур в г. Краснодаре, но и многие зарубежные линии – в Канаде, США, Франции и других странах, занимающихся селекцией подсолнечника (Friedt, 1992; Gavrilova, Anisimova, 2017).

Промышленное производство семян подсолнечника базируется на возделывании высокопродуктивных, устойчивых к болезням и вредителям гетерозисных гибридов, при получении которых преимущественно используется цитоплазматическая мужская стерильность (ЦМС) PET1-типа. После открытия ЦМС (Leclerq, 1966; Anashchenko, 1968) и источника восстановления фертильности пыльцы (Kinman, 1970) созданием линий подсолнечника на основе сортов отечественной селекции занялись также в странах Восточной Европы и США (Friedt, 1992; Seiler, Rieseberg, 1997). Гибридная селекция подсолнечника с использованием ЦМС PET1 (получен на основе однолетнего дикого вида *H. petiolaris* Nutt.) требует создания линий – восстановителей фертильности пыльцы. В большинстве случаев используемые при создании гибридов линии-восстановители несут доминантный аллель *Rf1*, который был первоначально передан от линии T66006-2-1-B, полученной на основе дикорастущего подсолнечника (Kinman, 1970). Линии, несущие ген *Rf1*, являются основными источниками признака восстановления фертильности пыльцы в гибридной селекции подсолнечника. В генетической коллекции ВИР насчитывается 20 линий ЦМС PET1 и их фертильных аналогов, а также 98 линий – восстановителей фертильности пыльцы (Gavrilova, Rozhkova, 2005; Anisimova et al., 2021) 10–28-го поколения инбридинга (см. рис. 5). Наличие генов восстановления фертильности пыльцы в гомозиготном доминантном состоянии в их генотипах установлено в полевых исследованиях при анализе гибридов F_1 и с использованием молекулярных маркеров. В коллекцию ВИР получена серия линий ЦМС, созданная в США на основе многолетних дикорастущих видов: ЦМС (GIG) – на основе *H. giganteus* L., ЦМС (MAX) – на основе *H. maximilliani* Schrad., ЦМС (RIG) – на основе *H. rigidus* (Cass.) Desf. (Kural, Miller, 1992; Jan et al., 1994), а также несколько источников ЦМС и восстановителей фертильности к ним, которые были созданы из однолетнего дикорастущего вида *H. annuus* в Болгарии (Christov, 1996, 1999). Сотрудниками ВИР в результате межвидовой гибридизации линий ЦМС культурного подсолнечника с многолетними дикими видами получены 15 линий – восстановителей фертильности пыльцы (Gavrilova, Rozhkova, 2005). Линии ЦМС и линии – восстановители фертильности пыльцы необходимы для селекции гибридов подсолнечника с использованием эффекта гетерозиса.

Основными лимитирующими факторами для реализации потенциальной урожайности сортов и гибридов является поражение подсолнечника различными патогенами. В настоящее время наибольший вред наносит ложная мучнистая роса (возбудитель – *Plasmopara halstedii* (Farl.) Berl. et De Toni). В связи с этим в результате многолетней оценки в поле отобраны линии, не поражаемые этим патогеном, и проведено их генотипирование. В генетическую коллекцию включены 39 линий, обладающих устойчивостью к различным расам ложной мучнистой росы, с идентифицированными генами устойчивости (Pl_5, Pl_6, Pl_8, Pl_{arg}), среди которых пять являются восстановителями фертильности (Gavrilova et al., 2021). Эффект гетерозиса у гибридов первого поколения выражен не только по продуктивности, но и по высоте растения, поэтому для достижения оптимальной высоты гибрида (100–150 см) исходные родительские формы должны быть короткостебельными. Нами созданы, изучены и включены в коллекцию 40 короткостебельных линий, из которых 28 обладают генами *Rf* (см. рис. 5) (Anisimova et al., 2024; Gavrilova et al., 2024).

Линии декоративного подсолнечника отличаются разнообразием окраски формы ложноязычковых и трубчатых цветков (лимонная, оранжевая, красная, бордовая, коричневая) и продолжительностью периода цветения за счет распускания боковых соцветий (Gavrilova et al., 2025). Этот материал предназначен для получения сортов для ландшафтного дизайна, срезочных и горшечных культур (Mladenovic et al., 2016).

Поддержание коллекции в живом состоянии

Все коллекционные образцы регулярно пересевают (каждый образец пересевают через 4 года) с использованием изоляции. Репродукции семян хранятся в рабочей коллекции при комнатной температуре, а также

в контролируемых условиях: оперативное хранение рабочей коллекции (+4°C) и длительное хранение базовой коллекции (–18°C). Создана электронная паспортная база данных коллекции, доступная всем пользователям на сайте института (https://vir.nw.ru/unu-kollektsiya-vir). Имеется электронная база данных с информацией о количестве семян каждого образца определенного года репродукции, сохраняемых в том или ином типе хранения. Базы данных по хранению доступны только для определенного круга лиц. Извлечь образец из хранения возможно только в случае потери его всхожести в рабочей коллекции с письменного разрешения директора института.

Коллекция регулярно пополняется за счет поступлений, получаемых от оригинаторов сортов и линий, а также благодаря созданию новых форм исследователями коллекции в институте.

Заключение

В Федеральном исследовательском центре Всероссийском институте генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР) сохраняются генетические ресурсы подсолнечника, включающие 2306 образцов культурного подсолнечника и 431 образец дикорастущих видов. Особенную ценность коллекции составляют отечественные высокомасличные сорта и сорта народной селекции, которые не представлены в других генбанках мира. В результате многолетнего изучения коллекция структурирована в соответствии с основными направлениями селекции и генетических исследований. Коллекция подсолнечника открыта для селекционеров страны и других исследователей генетических ресурсов и может быть использована для получения новых высокоурожайных сортов и гибридов подсолнечника с использованием эффекта гетерозиса.

References / Литература

Aleksanian S.M. Agrobiodiversity and geopolitics. St. Petersburg: VIR; 2002. [in Russian] (Алексанян С.М. Агробиоразнообразие и геополитика. Санкт-Петербург: ВИР; 2002).

Anashchenko A.V. Large-fruited forms of sunflower (Krupnoplodnye formy podsolnechnika). *Selektsiya i semenovodstvo = Plant Breeding and Seed Production*. 1972;(3):39-40. [in Russian] (Анащенко А.В. Крупноплодные формы подсолнечника. *Селекция и семеноводство*. 1972;(3):39-40).

Anashchenko A.V. Male sterility of sunflower (*Helianthus annuus*) (Muzhskaya sterilnost podsolnechnika [*Helianthus annuus*]): [dissertation]. Leningrad: VIR; 1968. [in Russian] (Анащенко А.В. Мужская стерильность подсолнечника (*Helianthus annuus*): дис. … канд. биол. наук. Ленинград: ВИР; 1968).

Anashchenko A.V., Gavrilova V.A., Anisimova I.N., Rozhkova V.T., Smirnova N.G. (comp.). Catalogue of the VIR global collection. Issue 286. Self-pollinated marked lines of sunflower. A.V. Anashchenko (ed.). St. Petersburg: VIR; 1992. [in Russian] (Каталог мировой коллекции ВИР. Выпуск 286. Самоопыленные маркированные линии подсолнечника / сост. А.В. Анащенко, В.А. Гаврилова, И.Н. Анисимова, В.Т. Рожкова, Н.Г. Смирнова; под ред. А.В. Анащенко. Санкт-Петербург: ВИР; 1992).

Anashchenko A.V., Popova A.I. Collection of wild sunflower and ways of its use in breeding (Kollektsiya dikorastushchego podsolnechnika i puti yeye ispolzovaniya v selektsii). *Agricultural Biology*. 1985;20(10):9-11. [in Russian] (Анащенко А.В., Попова А.И. Коллекция дикорастущего подсолнечника и пути ее использования в селекции. *Сельскохозяйственная биология*. 1985;20(10):9-11).

Anisimova I.N., Karabitsina Yu.I., Alpatieva N.V., Kuznetsova E.B., Titov N.V., Lyutko A.Yu. et al. Gavrilova V.A. Diagnostic value of *Rf1* gene molecular markers in sunflower. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2021;4(2):28-37. [in Russian] (Анисимова И.Н., Карабицина Ю.И., Алпатьева Н.В., Кузнецова Е.Б., Титов Н.В., Лютко А.Ю. и др. Диагностическая ценность молекулярных маркеров гена *Rf1* подсолнечника. *Биотехнология и селекция растений*. 2021;4(2):28-37). DOI: 10.30901/2658-6266-2021-2-o3

Anisimova I.N., Khafizova G.V., Makarova L.G., Alpatieva N.V., Ryazanova M.K., Borisenko O.M. et al. The inheritance pattern for the dwarf phenotype in hybrids from crosses among sunflower lines differing in alleles of the *Rht1* locus. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(3):135-146. [in Russian] (Анисимова И.Н., Хафизова Г.В., Макарова Л.Г., Алпатьева Н.В., Рязанова М.К., Борисенко О.М. и др. Особенности наследования карликового фенотипа у гибридов от скрещивания линий подсолнечника, различающихся по аллелям локуса *Rht1*. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(3):135-146). DOI: 10.30901/2227-8834-2024-3-135-146

Bazanov T.A., Uschapovsky I.V., Loginova N.N., Smirnova E.V., Mikhailova P.D. Molecular genetic diversity of flax cultivars (*Linum usitatissimum* L.) represented in the State Register for Selection Achievements of the Russian Federation. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(1):163-176. [in Russian] (Базанов Т.А., Ущаповский И.В., Логинова Н.Н., Смирнова Е.В., Михайлова П.Д. Молекулярно-генетическое разнообразие сортов льна (*Linum usitatissimum* L.), представленных в Госреестре селекционных достижений Российской Федерации. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(1):163-176). DOI: 10.30901/2227-8834-2023-1-163-176

Bochkarev N.I. The state of sunflower breeding and seed production in the USA (Sostoyaniye selektsii i semenovodstva podsolnechnika v SShA). *Selektsiya i semenovodstvo = Plant Breeding and Seed Production*. *Breeding and Seed Production*. 1985;(4):60. [in Russian] (Бочкарев Н.И. Состояние селекции и семеноводства подсолнечника в США. *Селекция и семеноводство*. 1985;(4):60).

Christov M. Hybridization of cultivated sunflower and wild *Helianthus* species. In: P.D.S. Caligari, D.J.N. Hind (eds). *Proceedings of the International Compositae Conference, Kew, 1994. Vol. 2: Compositae: Biology and Utilization*. Kew: Royal Botanic Gardens; 1996. p.603-615.

Christov M. Production of new CMS sources in sunflower. *Helia*. 1999;22(31):1-12.

Delectus seminum 2006–2010. Issue 1. St. Petersburg: VIR; 2006. [in Russian] (*Delectus seminum* 2006–2010. Вып. 1. Санкт-Петербург: ВИР; 2006).

Dragavtsev V.A. (ed.). Nikolai Ivanovich Vavilov's associates: plant genetic diversity researchers. St. Petersburg: VIR; 1994. [in Russian] (Соратники Николая Ивановича Вавилова: исследователи генофонда растений / под ред. В.А. Драгавцева. Санкт-Петербург: ВИР; 1994).

Fick C.N., Miller J.F. Sunflower breeding. In: J.F. Carter (ed.). *Sunflower Technology and Production*. Madison, WI: American Society of Agronomy; Crop Science Society of America; Soil Science Society of America; 1997. p.395-440.

Friedt W. Present state and future prospects of biotechnology in sunflower breeding. *Field Crop Research*. 1992;30(3-4):425-442. DOI: 10.1016/0378-4290(92)90009-X

Gavrilova V., Nizova N., Tolstaya T., Tavolzhansky N., Akhtulova E., Slyusar E. Production, study and utilization of sunflower interspecific hybrids. In: *Proceedings of the 15th International Sunflower Conference, Toulouse, France, 12–15 June 2000*. Paris: International Sunflower Association; 2000. p.7-12.

Gavrilova V.A., Anisimova N.I. Genealogy of the sunflower lines created on the basis of Russian varieties. *Helia.* 2017;40(67)133-146. DOI: 10.1515/helia-2017-0025

Gavrilova, V.A., Anisimova, I.N. Genetics of cultivated plants. Sunflower. St. Petersburg: VIR; 2003. [in Russian] (Гаврилова В.А., Анисимова И.Н. Генетика культурных растений. Подсолнечник. Санкт-Петербург: ВИР; 2003).

Gavrilova V.A., Anisimova I.N. Sources, trait-specific collections, and donors for sunflower breeding. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2025;8(4):7-16. [in Russian] (Гаврилова В.А., Анисимова И.Н. Источники, признаковые коллекции и доноры для селекции подсолнечника. *Биотехнология и селекция растений*. 2025;8(4):7-16). DOI: 10.30901/2658-6266-2025-4-o10

Gavrilova V.A., Anisimova I. N., Alpatyeva N.V., Rozhkova V.T, Stupnikova T.G. Karbitsina Yu.I., Kuznetsova E.B. Catalogue of the VIR global collection. Issue 853. Sunflower genetic collection. St. Petersburg: VIR; 2017. [in Russian] (Гаврилова В.А., Анисимова Н.И., Алпатьева Н.В., Рожкова В.Т., Ступникова Т.Г., Карабицина Ю.И., Кузнецова Е.Б. Каталог мировой коллекции ВИР. Выпуск 853. Генетическая коллекция подсолнечника. Санкт-Петербург: ВИР; 2017).

Gavrilova V.A., Makarova L.G., Stupnikova T.G., Alpatieva N.V., Kuznetsova E.B., Anisimova I.N. The trait-specific collection of large-seeded sunflower at VIR: a source for breeding cultivars and hybrids. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023.184(4):64-78. [in Russian] (Гаврилова В.А., Макарова Л.Г., Ступникова Т.Г., Алпатьева Н.В., Кузнецова Е.Б., Анисимова И.Н. Признаковая коллекция крупноплодного подсолнечника ВИР для селекции сортов и гибридов. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(4):64-78). DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-64-78

Gavrilova V.A., Makarova L.G., Stupnikova T.G., Bemova V.D., Anisimova I.N. Short-stemmed VIR lines for developing low-growth sunflower varieties and hybrids. *Journal of Agriculture and Environment*. 2024;1(41):10619. [in Russian] (Гаврилова В.А., Макарова Л.Г., Ступникова Т.Г., Бемова В.Д., Анисимова И.Н. Короткостебельные линии ВИР для создания низкорослых сортов и гибридов подсолнечника. *Journal of Agriculture and Environment*. 2024;1(41):10619). DOI: 10.23649/JAE.2024.41.21

Gavrilova V.A., Rozhkova V.T. Donors of pollen fertility restoration in CMS sunflower lines for heterosis breeding (Donory vosstanovleniya fertilnosti pyltsy TsMS liniy podsolnechnika dlya geterozisnoy selektsii). In: B.V. Rigin, E.I. Gayevskaya (eds). *Identified Plant Gene Pools and Breeding (Identifitsirovanny genofond rasteniy i selektsiya)*. St. Petersburg: VIR; 2005. p.377-389. [in Russian] (Гаврилова В.А., Рожкова В.Т. Доноры восстановления фертильности пыльцы ЦМС линий подсолнечника для гетерозисной селекции. В кн.: *Идентифицированный генофонд растений и селекция* / под ред. Б.В. Ригина, Е.И. Гаевской. Санкт-Петербург: ВИР; 2005. С.377-389).

Gavrilova V.A., Rozhkova V.T., Yesaev A.L. Genetic collections of the most important agricultural crops. Sunflower (Geneticheskiye kollektsii vazhneyshikh selskokhozyaystvennykh kultur. Podsolnechnik). In: B.V. Rigin, E.I. Gayevskaya (eds). *Identified Plant Gene Pools and Breeding (Identifitsirovanny genofond rasteniy i selektsiya)*. St. Petersburg: VIR; 2005. p.873-881. [in Russian] (Гаврилова В.А., Рожкова В.Т., Есаев А.Л. Генетические коллекции важнейших сельскохозяйственных культур. Подсолнечник. В кн.: *Идентифицированный генофонд растений и селекция* / под ред. Б.В. Ригина, Е.И. Гаевской. Санкт-Петербург: ВИР; 2005. С.873-881).

Gavrilova V.A., Stupnikova T.G., Isaeva M.V., Makarova L.G. Lines of ornamental sunflower from the genetic collection of VIR. *Oil Crops*. 2025;1(201):29-40. [in Russian] (Гаврилова В.А., Ступникова Т.Г., Исаева М.В., Макарова Л.Г. Линии декоративного подсолнечника генетической коллекции ВИР. *Масличные культуры*. 2025;1(201):29-40). DOI: 10.25230/2412-608X-2025-1-201-29-40

Gavrilova V.A., Stupnikova T.G., Makarova L.G., Alpatieva N.V., Karabitsina Yu.I., Kuznetsova E.B. et al. Lines resistant to downy mildew in the sunflower genetic collection at VIR. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021;182(3):101-110. [in Russian] (Гаврилова В.А., Ступникова Т.Г., Макарова Л.Г., Алпатьева Н.В., Карабицина Ю.И., Кузнецова Е.Б. и др. Линии генетической коллекции подсолнечника ВИР, устойчивые к ложной мучнистой росе. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2021;182(3):101-110). DOI: 10.30901/2227-8834-2021-3-101-110

Global sunflower production in 2025/26: forecasts (Mirovoye proizvodstvo podsolnechnika 2025/26: prognozy). Agrotrend; 2025. [in Russian] (Мировое производство подсолнечника 2025/26: прогнозы. Агротренд; 2025). URL: https://agrotrend.ru/news/52921-mirovoe-proizvodstvo-podsolnechnika-2025-26-prognozy [дата обращения: 20.01.2026].

Hu J., Seiler G.J., Kole C. Genetics, genomics and breeding of sunflower. Boca Raton, FL: CRC Press; 2010. DOI: 10.1201/b10192

International Grains Council. Global sunflower production in the 2025/26 season will grow by 9% (Mirovoye proizvodstvo podsolnechnika v sezone 2025/26 vyrastet na 9%). OleoScope; 2025. [in Russian] (Международный совет по зерну. Мировое производство подсолнечника в сезоне 2025/26 вырастет на 9%. OleoScope; 2025). URL: http://www.oleoscope.com/news/mirovoe-proizvodstvo-podsolnechnika-virastet [дата обращения: 20.01.2026].

Jan C.C., Zhang T.X., Miller J.F., Fick G.N. Fertility restoration and utilization of a male-sterile *H. rigidus* cytoplasm. In: *Proceedings of the 16th Sunflower Research Workshop, Fargo, ND, USA, January 1994*. Fargo, ND: National Sunflower Association; 1994. p.70-71.

Kinman M.L. New developments in the USDA and state experiment station sunflower breeding programs. In: *Proceedings of the Fourth International Sunflower Conference, Memphis, TN, USA, June 23–25, 1970*. Memphis, TN: International Sunflower Association; 1970. p.181-183.

Konarev V.G., Chmeleva E.V., Zakharova N.S., Anashchenko A.V., Ermolayeva L.N., Shchipkova L.E. (comp.). Catalogue of the VIR global collection. Sunflower accessions with characteristics of protein content in the kernel, methionine and lysine in the protein, and seed oil content (Obraztsy podsolnechnika s kharakteristikoy soderzhaniya belka v yadre, metionina i lizina v belke i maslichnosti semyan). Z.V. Chmeleva (ed.). Leningrad: VIR; 1980. [in Russian] (Каталог мировой коллекции ВИР. Образцы подсол-

нечника с характеристикой содержания белка в ядре, метионина и лизина в белке и масличности семян / сост. В.Г. Конарев, Э.В. Чмелева, Н.С. Захарова, А.В. Анащенко, Л.Н. Ермолаева, Л.Е. Щипкова; под ред. З.В. Чмелевой. Ленинград: ВИР; 1980).

Kural A., Miller J.F. The inheritance of male fertility restoration of the PET2, GIG1 and MAX1 sunflower cytoplasmic male sterility sources. In: *Proceedings of the 13th International Sunflower Conference, Pisa, Italy, 7–11 September, 1992*. Pisa: International Sunflower Association; 1992. p.1107-1112.

Leclercq P. Une stérilité mâle utilisable pour la production de hybrides simples de tournesol. *Annales de l'Amélioration des Plantes*. 1966;16:135-144.

Mladenović E., Cvejić S., Čukanović J., Žeravica G., Jocić S. Evaluation of sunflower genotypes for ornamental use. *Contemporary Agriculture*. 2016;65(1-2):39-43.

Morozov V.K., Sun satellite (Sputnik solntsa). Saratov: Volga Book Publishers; 1964. [in Russian] (Морозов В.К. Спутник солнца. Саратов: Приволжское книжное издательство; 1964).

Plachek E.M. Morphogenetic processes in sunflower under the influence of hybridization and inbreeding (Formoobrazovatelnye protsessy u podsolnechnika pod vliyaniyem gibridizatsii i intsukhta). In: *Proceedings of the U.S.S.R. Congress of Genetics, Plant and Animal Breeding held in Leningrad, January 10–16th, 1929*. *Vol. 2*. Leningrad; 1930. p.283-288. [in Russian] (Плачек Е.М. Формообразовательные процессы у подсолнечника под влиянием гибридизации и инцухта. В кн.: *Труды Всесоюзного съезда по генетике, семеноводству, семенному и племенному животноводству в Ленинграде 10–16 января 1929 г. Т. 2*. Ленинград; 1930. С.283-288).

Porokhovinova E.A., Dubovskaya A.G. Flax lines of hybrid origin homozygous for genes of chlorophyll coloration and other morphological features in the VIR flax genetic collection. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2023;6(4):28-39. [in Russian] (Пороховинова Е.А., Дубовская А.Г. Линии льна гибридного происхождения, гомозиготные по генам хлорофильной окраски и других морфологических признаков, в генетической коллекции ВИР. *Биотехнология и селекция растений*. 2023;6(4):28-39). DOI: 10.30901/2658-6266-2023-4-o5

Pustovoit V.S. Main trends of breeding practice (Osnovnye napravleniya selektsionnoy raboty). In: *Sunflower* (*Podsolnechnik*). Москва: Kolos; 1975. p.153-163. [in Russian] (Пустовойт В.С. Основные направления селекционной работы. В кн.: *Подсолнечник*. Москва: Колос; 1975. С.153-163).

Ruseed. Sunflower sowing area in Russia will decrease by 1.2% in 2025 (Ploshchad seva podsolnechnika v RF v 2025 godu sokratitsya na 1,2%). Telegram ROSNG Agroprom; 2025. [in Russian] (Ruseed. Площадь сева подсолнечника в РФ в 2025 году сократится на 1,2%). Telegram ROSNG Агропром; 2025). URL: http://www.rosng.ru/post/ploschad-seva-podsolnechnika-v-rf-v-2025-godu-sokratitsya-na-1-2-ruseed [дата обращения: 20.01.2026].

Rozhkova V.T., Anashchenko A.V. Creation of self-pollinated lines and heterotic hybrids of sunflower based on the material of the world collection (Sozdaniye samoopylennykh liniy i geterozisnykh gibridov podsolnechnika na materiale mirovoy kollektsii). *VIR Bulletin*. 1977;69:53-55. [in Russian] (Рожкова В.Т., Анащенко А.В. Создание самоопыленных линий и гетерозисных гибридов подсолнечника на материале мировой коллекции. *Бюллетень ВИР*. 1977;69:53-55).

Schilling E.E., Heiser C.B. Infrageneric classification of *Helianthus* (Compositae). *Taxon*. 1981;30(2):393-403. DOI: 10.2307/1220139

Schnabel U., Engelmann U., Horn R. Development of markers for the use of the PEF1 cytoplasm in sunflower hybrid breeding. *Plant Breeding*. 2008;127(6):587-591. DOI: 10.1111/j.1439-0523.2008.01516.x

Seiler G.J. Utilization of wild sunflower species for the improvement of cultivated sunflower. *Field Crops Research*. 1992;30(3-4):195-230. DOI: 10.1016/0378-4290(92)90002-Q

Seiler G.J., Gulya T., Marek L.F. Fifty years of collecting wild *Helianthus* species for cultivated sunflower improvement. *Helia*. 2023;46(78):1-5. DOI: 10.1515/helia-2023-0003

Seiler G.J., Pomery J.S., Dozet B., Gavrilova V.A. Wild sunflower germplasm collected from Great Lakes region of the United States. *Helia*. 1990;13:21-27.

Seiler G.J., Rieseberg L.H. Germplasm resources of sunflower. In: J.F. Carter (ed.). *Sunflower Technology and Production*. Madison, WI: American Society of Agronomy; Crop Science Society of America; Soil Science Society of America; 1997. p.21-65.

Škorić D., Seiler G.J., Liu Z., Jan C.C., Miller G.F., Charlet L.D. Sunflower genetics and breeding: international monography. Novi Sad: Serbian Academy of Sciences and Arts; 2012.

Smirnov V.G. Importance of genetic collections for fundamental research (Znacheniye geneticheskikh kollektsiy dlya fundamentalnykh issledovaniy). In: B.V. Rigin, E.I. Gayevskaya (eds). *Identified Plant Gene Pools and Breeding (Identifitsirovanny genofond rasteniy i selektsiya)*. St. Petersburg: VIR; 2005. p.783-806. [in Russian] (Смирнов В.Г. Значение генетических коллекций для фундаментальных исследований. В кн.: *Идентифицированный генофонд растений и селекция* / под ред. Б.В. Ригина, Е.И. Гаевской. Санкт-Петербург: ВИР; 2005. С.783-806).

Terzić S., Boniface M.C., Marek L., Alvarez D., Baumann K., Gavrilova V. et al. Gene banks for wild and cultivated sunflower genetic resources. *Oilseeds and Fats, Crops and Lipids*. 2020;27(10):9. DOI: 10.1051/ocl/2020004

Truskinov E.V. Russian agricultural representation in America (Russkoye selskokhozyaystvennoye predstavitelstvo v Amerike). St. Petersburg: VIR; 2012. [in Russian] (Трускинов Э.В. Русское сельскохозяйственное представительство в Америке. Санкт-Петербург: ВИР; 2012).

Vavilov N.I. Selected works. Vol. 5. Problems of plant origin, geography, genetics, breeding, cultivation and agronomy (Izbrannye trudy. T. 5. Problemy proiskhozhdeniya, geografii, genetiki, selektsii rasteniy, rasteniyevodstva i agronomii). Moscow; Leningrad: USSR Academy of Sciences; 1965. [in Russian] (Вавилов Н.И. Избранные труды. Т. V. Проблемы происхождения, географии, генетики, селекции растений, растениеводства и агрономии. Москва; Ленинград: АН СССР; 1965).

VIR plant genetic resources gene bank: [website]. [in Russian] (Коллекция генетических ресурсов растений ВИР: [сайт]). URL: https://www.vir.nw.ru/unu-kollektsiya-vir [accessed Jan. 20, 2026].

Zhuchenko A.A., Rozhmina T.A. Mobilization of flax genetic resources (Mobilizatsiya geneticheskikh resursov lna). Staritsa; 2000. [in Russian] (Жученко А.А., Рожмина Т.А. Мобилизация генетических ресурсов льна. Старица; 2000).

Информация об авторах

Вера Алексеевна Гаврилова, 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, v.gavrilova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-8110-9168

Лариса Георгиевна Макарова, ведущий специалист, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, larisa.mackarova@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-7913-3815

Ирина Николаевна Анисимова, 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, irina_anisimova@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0003-0474-8860

Information about the authors

Vera A. Gavrilova, Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, v.gavrilova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-8110-9168

Larisa G. Makarova, Leading Specialist, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, larisa.mackarova@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-7913-3815

Irina N. Anisimova, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, irina_anisimova@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0003-0474-8860

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 11.02.2026; одобрена после рецензирования 05.03.2026; принята к публикации 10.04.2026.
The article was submitted on 11.02.2026; approved after reviewing on 05.03.2026; accepted for publication on 10.04.2026.

МОБИЛИЗАЦИЯ И СОХРАНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 635.21:631.523+631.526.32
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o18

CC BY

Генотипирование старых отечественных сортов картофеля, сохраняемых на Полярной опытной станции ВИР

Д. А. Рыбаков[1], О. Ю. Антонова[1], С. Н. Травина[2], О. С. Косарева[1], Т. А. Гавриленко[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, Полярная опытная станция – филиал ВИР, Апатиты, Россия

Автор, ответственный за переписку: Татьяна Андреевна Гавриленко, tatjana9972@yandex.ru

Актуальность исследования связана с необходимостью совершенствования методов сортовой идентификации и перепроверки дублетных образцов, что особенно важно для крупных коллекций, включающих старые сорта, для которых зачастую не хватает систематизированной информации об их отличительных признаках.
Материалы и методы. В работе изучены 39 старых отечественных сортов картофеля, сохраняемых на Полярной опытной станции ВИР, 29 из которых были представлены 2–3 дублетными образцами. Проведены поиск литературных данных и верификация сортоспецифичных морфологических признаков этих образцов, генотипирование с использованием набора микросателлитных маркеров и молекулярный скрининг с маркерами ряда генов, контролирующих устойчивость к *Globodera rostochiensis* (Wollenweber) Behrens, *Synchytrium endobioticum* (Schilbersky) Percival, *Phytophthora infestans* (Montagne) de Bary, а также с широко используемыми маркерами разных типов пластидной и митохондриальной ДНК.
В результате проведенных исследований для 37 образцов старых сортов получены: индивидуальные SSR-профили; информация об их типах органельных ДНК; данные о наличии/отсутствии маркеров, ассоциированных с генами устойчивости к ряду вредных организмов. У 25 из 29 сортов, представленных разным числом дублетов, SSR-профили совпали для всех образцов, а у 4 образцов выявлены несовпадения.
Заключение. Полученные результаты подтверждают литературные данные о перспективах использования микросателлитного анализа для повышения эффективности традиционных методов верификации сортоспецифичных признаков и выявления дублетных образцов в биоресурсных коллекциях.

Ключевые слова: *Solanum tuberosum*, маркеры ДНК, анализ SSR, коллекции, сорта, дублетные образцы

Благодарности: работа выполнена в рамках государственных заданий согласно тематическому плану ВИР по теме № FGEM-2022-0008.
Авторы выражают глубокую благодарность: д-ру биол. наук, профессору Л. И. Костиной за поддержку и ценные консультации по оценке сортоспецифичных признаков; научному сотруднику Н. В. Лебедевой за участие в отборе фрагментов ткани гербарных образцов и канд. биол. наук О. С. Ефремовой за участие во введении образцов в *in-vitro*-коллекцию.

Для цитирования: Рыбаков Д.А., Антонова О.Ю., Травина С.Н., Косарева О.С., Гавриленко Т.А. Генотипирование старых отечественных сортов картофеля, сохраняемых на Полярной опытной станции ВИР. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(2):21-34. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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.

© Рыбаков Д.А., Антонова О.Ю., Травина С.Н., Косарева О.С., Гавриленко Т.А., 2026

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

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o18

Genotyping of old potato cultivars preserved at the Polar Experiment Station of VIR

Daniil A. Rybakov[1], Olga Yu. Antonova[1], Svetlana N. Travina[2], Olga S. Kosareva[1], Tatjana A. Gavrilenko[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, Polar Experiment Station – branch of VIR, Apatity, Russia*

Corresponding author: Tatjana A. Gavrilenko, tatjana9972@yandex.ru

Background. The relevance of the study is in the need to improve methods of varietal identification and re-examination of duplicate accessions. It is especially important for large collections that include old breeding cultivars, because they often lack systemized information about their distinctive traits.
Materials and methods. The study covered 39 old potato cultivars preserved at the Polar Experiment Station of VIR, 29 of which were represented by 2–3 duplicate accessions. A search for published data and verification of cultivar-specific morphological traits were conducted, along with microsatellite genotyping and molecular screening using markers of genes controlling resistance to *Globodera rostochiensis* (Wollenweber) Behrens, *Synchytrium endobioticum* (Schilbersky) Percival, *Phytophthora infestans* (Montagne) de Bary, as well as widely used markers of plastid and mitochondrial DNA types.
Results. As a result, individual SSR profiles, information on organelle DNA types, and data about the presence/absence of markers associated with resistance genes for several pathogens and pests were obtained for 37 accessions of old potato cultivars. For 25 out of 29 cultivars that were represented by different numbers of duplicates, SSR profiles were identical for all such accessions, while four accessions manifested discrepancies when compared with their duplicates.
Conclusion. The results of SSR analysis for duplicate accessions confirmed the published data on the prospects of using microsatellite analysis to increase the efficiency of bioresource collection management, especially as far as old cultivars are concerned.

Keywords: *Solanum tuberosum*, DNA markers, SSR analysis, collections, cultivars, duplicate accessions

Acknowledgments: the research was performed within the framework of the state tasks, Project No. FGEM-2022-0008.
The authors express their profound gratitude to Prof. Dr. L. I. Kostina for her support and valuable consultations on the assessment of cultivar-specific traits, N. V. Lebedeva for her aid in the selection of tissue fragments from the herbarium specimens, and O. S. Efremova for her contribution to the establishment of the *in vitro* potato germplasm maintained at the Polar Experiment Station of VIR.

For citation: Rybakov D.A., Antonova O.Yu., Travina S.N., Kosareva O.S., Gavrilenko T.A. Genotyping of old potato cultivars preserved at the Polar Experiment Station of VIR. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(2):21-34. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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

В полевой коллекции Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР) поддерживается свыше 2300 селекционных сортов картофеля, что сопоставимо наиболее крупными коллекциями европейских и азиатских генбанков: 2952 – в ICAR-Central Potato Research Institute (CPRI, Индия) и 1943 сорта в IPK Genebank (GLKS, Германия) (Nagel et al., 2022).

Первые коллекции селекционных сортов картофеля в России, которые поначалу были представлены преимущественно зарубежными сортами, создавались на базе Бюро по прикладной ботанике и Петровской сельскохозяйственной академии (в настоящий момент Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева); на основе последней была организована Кореневская картофельная селекционная станция (сейчас Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха) (Bukasov, 1959). В настоящее время самая крупная коллекция отечественных сортов картофеля сохраняется в коллекции ВИР.

Полевая коллекция селекционных сортов картофеля в ВИР поддерживается в двух локациях: на научно-производственной базе (НПБ) «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» (г. Пушкин, Санкт-Петербург) и на Полярной опытной станции – филиале ВИР (Полярная ОС ВИР, г. Апатиты Мурманской обл.). На Полярной ОС ВИР (до 1931 г. – опорный пункт «Хибины») коллекция сортов поддерживалась начиная с 1920-х годов; параллельно с этим на станции велась активная селекционная работа, которую проводили: С. А. Аникина, М. А. Вавилова, М. Н. Веселовская, И. А. Веселовский, Л. А. Дремлюг, Н. Н. Иванова, А. М. Козелецкая, Ф. И. Маньков, Г. Д. Мельничук и И. Г. Эйхфельд (Travina, 2020).

Начиная с 1930-х годов в селекционный процесс вовлекались образцы южноамериканских видов картофеля, собранные С. В. Юзепчуком и С. М. Букасовым в 1925–1928 гг. в ходе латиноамериканской экспедиции, организованной Н. И. Вавиловым. Выделившиеся по признакам раннеспелости и устойчивости к кратковременным заморозкам образцы вовлекали в селекционную работу (Travina, 2020). В результате в первой половине XX века на Полярной ОС ВИР были получены сорта: ‘Апатит’ (‘Epicure’ × *S. boyacense*), ‘Имандра’ (‘Jubel’ × *S. andigenum* f. *tocanum*), ‘Марникве’ (‘Epicur’ × (*S. andigenum* f. *tocanum* × ‘Centifolia’), ‘Хибинка’ [‘Early Rose’ × (‘Fürstenkrone’ × *S. andigenum* var. *guechuanum*)], ‘Хибинский Морозостойкий’ (‘Epicure’ × *S. curtilobum*) и др. (Zaytseva, 1950; Bukasov, 1959; Anikina et al., 1986; Kostina, Kosareva, 2017; Travina, 2020).

Общей проблемой в изучении старых селекционных сортов картофеля является недостаток систематизированной информации об их происхождении и отличительных признаках. Например, в паспортной базе данных генетических ресурсов растений ВИР для отечественных сортов указаны их названия на русском и английском языках, каталожные и интродукционные номера образцов в коллекции ВИР, даты включения в коллекцию, страна происхождения, институт-селекционер (оригинатор), генеалогия на русском и английском и т. д. Отметим, что для некоторых старых отечественных сортов данная информация представлена фрагментарно (https://www.vir.nw.ru). Более подробные данные о происхождении и сортоспецифичных признаках можно найти и в литературных источниках (Zaytseva, 1935, 1950; Zaytseva et al., 1975; List No. 5…, 1958; Kostina, Kosareva, 2017). Поиск такой информации осложнен частым использованием в названиях старых сортов нескольких названий-синонимов, или переводных названий, или транслитерации зарубежных слов. Так, например, сорт ‘Courier’ возделывался на территории СССР с пятью синонимами – ‘Азия Б’, ‘Курьер’, ‘Серп и Молот’, ‘Снежинка № 2’, ‘Снежинка № 3’ (Zaytseva, 1935).

Около 20 лет назад в ВИР начались работы по генотипированию сортов картофеля с использованием разных наборов микросателлитных (SSR-) маркеров и ДНК-маркеров различных локусов органельной ДНК (Antonova et al., 2004, 2016, 2020; Gavrilenko et al., 2007, 2019; Shvachko, 2012). Микросателлитные маркеры, отобранные для генотипирования отечественных сортов картофеля из коллекции ВИР, были подобраны по литературным источникам, поскольку они активно использовались и в других генбанках для SSR-профилирования зарубежных сортов: Leibniz Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research (IPK), Германия (Diekmann et al., 2017); Estonian Crop Research Institute (ECRI), Эстония (Ivanova-Pozdejeva et al., 2021); Central Potato Research Institute (ICAR), Индия (Bhardwaj et al., 2023); Agricultural Biotechnology Research Institute (AARI), Пакистан (Bhardwaj et al., 2023); National Agricultural Research Institute (NARI), Гамбия (Ghebreslassie et al., 2016).

Помимо генотипирования, SSR-маркеры также эффективно используются для выявления дублетов и ошибок при поддержании образцов в коллекциях (Reid et al., 2011; Diekmann et al., 2017; Ivanova-Pozdejeva et al., 2021). Так, в работе A. Reid с коллегами при помощи SSR-маркеров проанализировали более двухсот сортов, представленных различным числом дублетных образцов из 4 разных коллекций (Reid et al., 2011). В итоге было выявлено около 10% несовпадений: пары образцов с одинаковым названием, но разными SSR-профилями, а также образцы с разными названиями и одинаковым профилем.

Задачи настоящей работы включали: SSR-генотипирование старых отечественных селекционных сортов картофеля, сохраняемых на Полярной опытной станции ВИР, верификацию дублетных образцов, выявление возможных ошибок при передаче или при поддержании образцов в полевой коллекции (некоторые образцы поддерживались более ста лет).

Материалы и методы

Материал включал 39 старых отечественных сортов картофеля, сохраняемых на Полярной ОС ВИР (табл. 1). В исследования также был привлечен сорт ‘Хибины № 3’, выведенный на станции в 1937 г., который сохранился только в полевой коллекции НПБ. Из 39 сортов 29 были представлены 2–3 дублетными образцами; суммарно в исследование были привлечены 38 дублетных образцов: 23 образца из коллекции *in vitro* ВИР, 11 образцов из полевой коллекции, сохраняемых в НПБ «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР», а также 4 образца из основного фонда Гербария культурных растений мира, их диких родичей и сорных растений (Гербарий WIR) (см. табл. 1). Судя по найденным литературным данным, большинство сортов изученной выборки были выведены до 1950 г.; для ряда сортов информация не найдена, поэтому в этих случаях в таблице 1 указан либо год интродукции образца в коллекцию ВИР, либо дата первого упоминания названия сорта, найденного нами в литературе.

Таблица 1. **Изученные в работе образцы**
Table 1. **Accessions analyzed in the study**

Образец	Каталог ВИР, к-	Год[1]	Число образцов, полученных из различных источников (число независимо выделенных препаратов ДНК)				Всего
			ПОС	НПБ	Коллекция *in vitro*	Гербарий WIR	
‘Апатит’ (2/32)	вк-52	1937	1	–	1	–	2
‘Белоклубневый’	2264	1954*	1	–	1	–	2
‘Белоплет’ (16/67)	вк-112	1950**	1	–	1	–	2
‘Гуменючка’	737	1917**	1	–	1	–	2
‘Детскосельский’	2902	1959	1	1	1	1	4
‘Драгоценность Агнелли’	740	1920**	1 (2)	–	–	–	1 (2)
‘Заполярный’ (51/571)	10181	1957*	1	–	1	–	2
‘Злата’	743	1953*	1	–	1	–	2
‘Игарский’ (сеянец 101)	1288	1956*	1	–	–	–	1
‘Имандра’	1262	1934	1	1	–	–	2
‘Камераз 1’	1255	1938	1	1 (3)	1	–	3 (5)
‘Картофель Дарвина’	вк-11	–	1	–	1	–	2
‘Кинельский Богатырь’ А[2]	2256	1948*	1 (2)	–	–	–	1 (2)
‘Кинельский Богатырь’ Б[2]	2256	1948*	1	–	1	–	2
‘Киселивка’	2971	1958*	1	–	1	–	2
‘Коллективный’	751	1922	1	–	1	–	2
‘Кореневский’	753	1922	1	1	–	–	2
‘Красный Костромской’	758	1938**	1	–	1	–	2
‘Крестьянка Рединга’	760	1926**	1	–	–	–	1
‘Кустистая Роза’	2313	1953*	1	–	–	–	1
‘Лорх’	766	1922	1	1 (3)	1[3]	–	3 (5)
‘Люстдорфская’	767	1956*	1	–	–	–	1
‘Московский’	778	1925	1	–	–	–	1
‘Октябренок’	1273	1928	1 (2)	1	–	1	3 (4)
‘Подарок Родине’	1275	1953*	1	–	1	–	2
‘Свердловский’	808	1950	1	–	1	–	2
‘Сибиряк’ (сеянец 36/15)	812	1937	1	–	–	1	2
‘Скороспелка’	2265	1954	1	–	–	–	1
‘Смысловский’	814	1905	1 (2)	–	–	1	2 (3)
‘Снежинка № 3’	816	1924	1	–	–	–	1
‘Спутник’ (23/524)	вк-130	1964**	1 (2)	–	–	–	1 (2)
‘Устьбез’	827	1938*	1	–	1	–	2
‘Хамелеон’	831	1953*	1	–	1	–	2

Таблица 1. Окончание
Table 1. The end

Образец	Каталог ВИР, к-	Год[1]	Число образцов, полученных из различных источников (число независимо выделенных препаратов ДНК)				Всего
			ПОС	НПБ	Коллекция *in vitro*	Гербарий WIR	
'Хибинка' (6/178)	832	1935*	1	–	1	–	2
'Хибинская Скороспелка' (4/29)	1290	1936	1	–	1	–	2
'Хибинский Двуурожайный' (19/51)	вк-62	1936	1	–	1	–	2
'Хибинский Морозостойкий' (32/102)	вк-134	1934	1	–	1	–	2
'Хибины № 3'	830	1937	–	1	–	–	1
Элита 158	944	1948*	1	–	1	–	2
'Якутский'	841	1923*	1	–	–	–	1
Всего изучено образцов			39	7	23	4	**73**
Число независимо выделенных препаратов ДНК:			44	11	23	4	**87**

Примечание: [1] – в столбце «Год» указан год выведения сорта, а в случае если эта информация не была найдена, то (*) отмечен год интродукции образца в коллекцию ВИР или (**) – год первого упоминания названия сорта в литературе; [2] – различающиеся по морфологии клоны сорта 'Кинельский Богатырь' были обозначены куратором коллекции как А и Б; [3] – образец сорта 'Лорх' в 2016 г. был передан из ФИЦ картофеля им. А.Г. Лорха в коллекцию *in vitro* ВИР; НПБ – научно-производственная база «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР». Серая заливка обозначает образцы, сортовая принадлежность которых поставлена под сомнение по данным молекулярно-генетического анализа или по результатам верификации ряда морфологических признаков

Note: [1] – the column "Год" (Year) contains the year when the cultivar was released, but if such information is not available, (*) denotes the year when the accession entered the VIR collection, and (**) marks the year when the cultivar's name was for the first time mentioned in published sources; [2] – morphologically distinct clones of cv. 'Kinelsky Bogatyr' were indexed by the collection curator as A and Б; [3] – a sample of cv. 'Lorkh' was submitted in 2016 by the Russian Potato Research Center to the *in vitro* collection of VIR; НПБ refers to Pushkin and Pavlovsk Laboratories of VIR. Grey shading indicates accessions whose varietal identity is questionable according to the data of molecular genetic analysis or the verification of certain morphological traits

Некоторые сорта, перечисленные в таблице 1, были выведены зарубежными селекционерами, тем не менее мы их также включили в исследования, поскольку они в разное время широко возделывались в Советском Союзе и/или участвовали в проводимых советскими селекционерами отборах. Названия таких сортов в истории отечественной селекции были зафиксированы на русском языке: например, сорт 'Courier' (синонимы: 'Курьер', 'Снежинка № 3', 'Серп и Молот' и др.) был районирован в шести областях и двух республиках СССР; сорт 'Смысловский' – результат улучшенного отбора из немецкого сорта 'Fürstenkrone' – был районирован в шести областях Советского Союза (Zaytseva, 1950).

Методы

Верификацию сортовой принадлежности образцов экспериментальной выборки проводили, сравнивая их морфологические признаки с указанными в литературе сортоспецифическими признаками (Zaytseva, 1935, 1950). При изучении признаков венчика, клубней, световых ростков руководствовались «Широким и унифицированным классификатором…» (Bukasov et al., 1977)

Выделение тотальной ДНК проводили 1) из образцов полевой коллекции и коллекции *in vitro* с помощью модифицированного метода CTAB-экстракции (Antonova et al., 2020). Растительным материалом для выделения ДНК послужили листья побегов, кожура и световые ростки клубня, а также листья микрорастений; 2) из листьев гербарных образцов при помощи набора с силиконированными колонками DNeasy Plant Mini Kit (Qiagen, Германия).

Молекулярный скрининг образцов проводили с помощью маркеров *R*-генов, контролирующих устойчивость: к патотипу Ro1 *Globodera rostochiensis* (Wollenweber) Behrens, маркеры гена *H1* – 57R (Schultz et al., 2012) и N195 (Takeuchi et al., 2008; Mori et al., 2011); расоспецифичной устойчивости к *Phytophthora infestans* (Montagne) de Bary, маркер R1 гена *R1* (Mori et al., 2011); к патотипу 1 *Synchytrium endobioticum* (Schilbersky) Percival, маркер NL25 гена *Sen1* (Gebhardt et al., 2006). Определение типов пластидной и митохондриальной ДНК сортов проводили с маркерами из набора К. Хосака и Р. Санэтомо (Hosaka, Sanetomo, 2012).

Во всех случаях протоколы ПЦР соответствовали условиям разработчиков праймеров, за исключением маркера NL25 гена *Sen1*: в последнем случае использовали модифицированную программу 94°C – 5 мин; 8 циклов [94°C – 45 с, 58°C – 1 мин, 72°C – 2 мин], 30 циклов [94°C – 45 с, 58°C – 45 с, 72°C – 2 мин] и заключительная элонгация 72°C в течение 10 минут.

SSR-генотипирование выполнено с помощью восьми пар микросателлитных праймеров, разработанных ря-

дом авторов: STM0037, STM2005 (Milbourne et al., 1998); StI004, StI032, StI033, StI046 (Feingold et al., 2005); STG0016, STM5114 (Ghislain et al., 2009); шесть из восьми маркеров входят в набор PGI – Potato Genetic Identification (Ghislain et al., 2009). Те же самые SSR-маркеры использовались нами ранее для генотипирования современных российских сортов (Antonova et al., 2020). В этой работе также приведены протоколы проведения ПЦР и разделения фрагментов. Продукты ПЦР, полученные при амплификации с SSR-праймерами, разделяли электрофорезом в 8-процентных денатурирующих полиакриламидных гелях на приборе LI-COR 4300S DNA Analyzer с лазерной детекцией фрагментов. В качестве стандартов молекулярного веса использовали маркеры фирмы LI-COR "50-350 bp" (LI-COR Biotechnology, США) (https://www.licor.com). Полученные данные заносили в таблицу Excel. Для оценки полиморфизма микросателлитных локусов применяли индекс PIC (polymorphic information content).

Статистическую обработку проводили на основе бинарной матрицы Excel и PAST V4.03 (Hammer et al., 2001). Кластерный анализ проводили с использованием методов NJ, UPGMA (мера сходства Dice и Jaccard) и Ward, достоверность узлов оценивали бутстреп-анализом с 10 000 репликаций.

Результаты и обсуждение

Верификация морфологических признаков образцов старых сортов

На первом этапе была проведена систематизация доступной нам информации о происхождении и сортоспецифичных морфологических признаках старых сортов. Учитывались записи многолетних наблюдений образцов полевой коллекции Полярной ОС ВИР, данные каталогов ВИР и других институтов, а также литературные данные (Zaytseva, 1935, 1950; Zaytseva et al., 1975; Anikina et al., 1986; Kostina, Kosareva, 2017; etc.). Согласно найденной информации, большинство сортов анализируемой выборки создавались в первой половине XX века (см. табл. 1). К сожалению, детальная информация для большинства старых сортов была фрагментарной, полные и подробные описания найдены для пятнадцати сортов выборки. На следующем этапе проводили сопоставление найденной информации о сортоспецифичных признаках (окраска и форма венчика, форма клубня, окраска кожуры, морфология световых ростков клубней) с наблюдаемыми признаками анализируемых образцов. Следует учитывать, что данные образцы длительное время поддерживались в полевой коллекции и накопили вирусные инфекции, что в ряде случаев обусловило изменение морфологических признаков листовой пластинки и неспособность растений формировать репродуктивные органы.

В единичных случаях были выявлены несоответствия: например, образец сорта 'Сибиряк' (сеянец 36/15) (к-812) имел белые цветки, тогда как Н. Д. Зайцева у этого сорта отмечает красно-фиолетовую окраску венчиков (Zaytseva, 1950). В связи с этим для дальнейшего SSR-генотипирования образец к-812 был заменен на образец сорта 'Сибиряк' (сеянец 36/15) из гербарной коллекции – WIR-78482, который имеет венчик красно-фиолетовой окраски (см. табл. 1).

Различия в окраске венчиков также были обнаружены между двумя дублетами образца к-1273 сорта 'Октябренок' – из коллекции Полярной ОС ВИР (с окрашенным венчиком) и из НПБ «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» (с белыми цветками). По литературным данным, сорт 'Октябренок' обладает красно-фиолетовой окраской венчика (Zaytseva, 1950). Дополнительно в анализируемую выборку был привлечен образец сорта 'Октябренок' (WIR-78314) из Гербария WIR (см. табл. 1).

Молекулярный скрининг

Для верификации старых сортов также важна информация о наличии/отсутствии определенных типов цитоплазм, а также маркеров генов устойчивости к определенным вредным организмам, что связано с развитием различных направлений советской селекции картофеля.

Молекулярный скрининг с маркерами разных типов цитоплазм

У всех образцов проанализированной выборки был выявлен чилийский T-тип цитоплазмы со специфичной делецией 241 пн в межгенном спейсере *ndhC/trnV* хлДНК и с β-типом мтДНК. Этот тип цитоплазмы характерен для старых сортов, созданных в разных странах в конце XIX века – первой половине XX века (Hosaka, Sanetomo, 2012; Sanetomo, Gebhardt, 2015). В то же время в современном отечественном генофонде чилийский T-тип цитоплазмы встречается меньше чем у половины сортов, поскольку с развитием методов межвидовой гибридизации во второй половине XX века появляются отечественные сорта с типами цитоплазм D и W/γ, интрогрессированными от мексиканских видов картофеля (Gavrilenko et al., 2019).

***Молекулярный скрининг с маркером гена Sen1, контролирующего устойчивость к патотипу 1 Synchytrium endobioticum* (Schilb.) Percival**

Важную информацию для верификации старых селекционных сортов могут предоставить результаты молекулярного скрининга с маркером NL25 гена *Sen1*, контролирующего устойчивость к патотипу 1 возбудителя рака картофеля *S. endobioticum* (в нашей стране распространен только этот патотип). Селекция отечественных ракоустойчивых сортов картофеля началась в конце 1920-х годов; до середины 1960-х годов большая часть районированных сортов оставалась восприимчивой к патотипу 1, и только с 1979 г., согласно постановлению правительства от 6 июля 1979 г. № 656 «О мерах по улучшению организации карантина растений в СССР», все сорта, включаемые в Госреестр, должны обладать ракоустойчивостью. Можно ожидать, что большая часть старых отечественных сортов, созданных в первой половине XX века, не обладает диагностическим фрагментом маркера NL25 гена *Sen1*. Действительно, у большей части старых сортов экспериментальной выборки диагностический фрагмент маркера NL25 выявлен не был (табл. 2, рис. 1). К сожалению, для 23 сортов анализируемой выборки не удалось найти информацию об их фитопатологической устойчивости к *S. endobioticum*. Тем не менее для 15 из 17 сортов с известными из литературы данными об их ракоустойчивости/восприимчивости выявлено совпадение с результатами молекулярного скрининга, а в двух случаях выявлены несовпадения (см. табл. 2).

Так, сорт 'Октябренок' является одним из первых ракоустойчивых советских сортов (Zaytseva, 1950), однако у образца к-1273 из полевой коллекции Полярной ОС ВИР (с окрашенным венчиком) диагностический фраг-

Таблица 2. Результаты молекулярного скрининга сортов картофеля с маркером NL25 гена *Sen1*

Table 2. Results of molecular screening of potato cultivars with the NL25 marker of the *Sen1* gene

R/S*	NL25	Образцы
R	1	N = 6: ‘Детскосельский’, ‘Заполярный’ (51/571), ‘Имандра’, ‘Камераз 1’, ‘Снежинка № 3’, ‘Спутник’ (23/524)
S	0	N = 9: ‘Белоплет’ (16/67), ‘Кореневский’, ‘Лорх’, ‘Московский’, ‘Свердловский’, ‘Сибиряк’ (сеянец 36/15), ‘Смысловский’, ‘Хибинская Скороспелка’ (4/29), ‘Хибинский Двуурожайный’ (19/51).
–	1	N = 10: ‘Белоклубневый’, ‘Туменючка’, ‘Картофель Дарвина’, ‘Кинельский Богатырь’ (Б), ‘Киселивка’, ‘Красный Костромской’, ‘Крестьянка Рединга’, ‘Кустистая Роза’, ‘Люстдорфская’, ‘Устьбез’
–	0	N = 13: ‘Апатит’, ‘Драгоценность Агнелли’, ‘Злата’, ‘Игарский’ (сеянец 101), ‘Кинельский Богатырь’ (А), ‘Коллективный’, ‘Подарок Родине’, ‘Скороспелка’, ‘Хамелеон’, ‘Хибинка’ (6/178), ‘Хибинский Морозостойкий’ (32/102), Элита 158, ‘Якутский’
R	0	N = 2: ‘Октябренок’**, ‘Хибины № 3’**

Примечание: N – число образцов; 1 – наличие маркера NL25; 0 – отсутствие этого маркера; * – информация о наличии в выборке сортов, устойчивых (R) или восприимчивых (S) к первому патотипу *Synchytrium endobioticum*, зафиксирована по данным фитопатологической оценки, результаты которой приведены в литературных источниках (Zaytseva, 1950; List No. 4…, 1956; List No. 6…; 1964, Zaytseva et al., 1975; Komarov et al., 1983); прочерк (–) означает, что данные о ракоустойчивости/восприимчивости сортов не были найдены; ** – см. пояснения в тексте

Note: N means the number of accessions; 1 means the presence of the NL25 marker; 0 means the absence of this marker; * – the information on the presence of cultivars resistant (R) or susceptible (S) to the first pathotype of *Synchytrium endobioticum*, as determined by phytopathological evaluation, was obtained from published sources (Zaytseva, 1950; List No. 4…, 1956; List No. 6…, 1964; Zaytseva et al., 1975; Komarov et al., 1983); the dash (–) indicates that no data on resistance/susceptibility to potato wart disease was found; ** – see explanations in the text

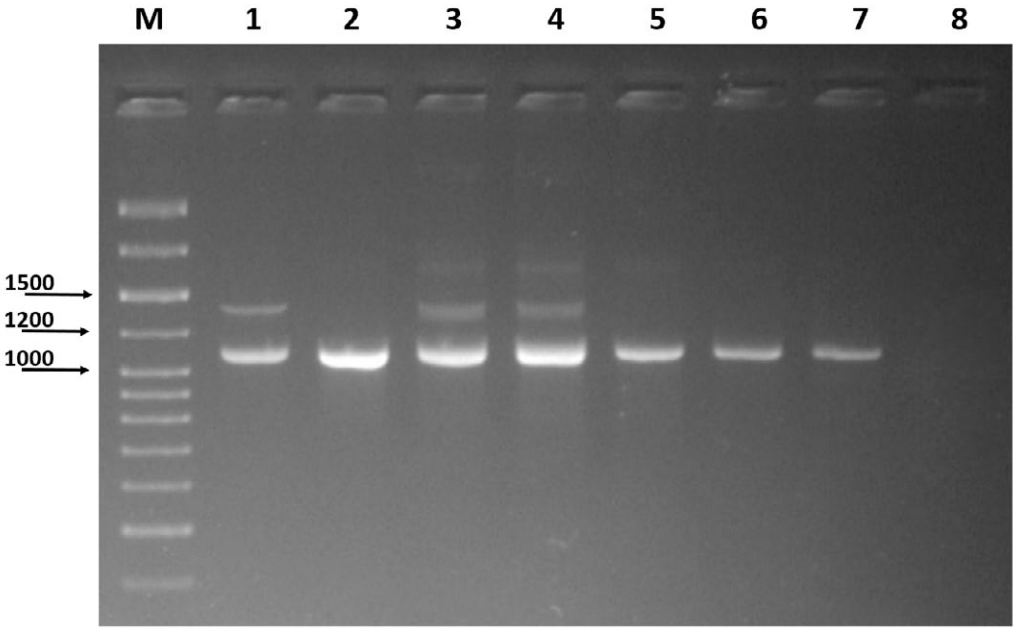


Рис. 1. Молекулярный скрининг сортов картофеля с маркером NL25, сцепленным с геном *Sen1*, где:
M – маркер молекулярного веса; **1** – ‘Чародей’ («+» контроль); **2** – ‘Лорх’; **3** – ‘Снежинка № 3’; **4** – ‘Люстдорфская’; **5** – ‘Кореневский’; **6** – ‘Московский’; **7** – ‘Игарский’ (сеянец 101); **8** – вода («–» контроль).
Диагностический фрагмент маркера NL25 – 1400 пн

Fig. 1. Molecular screening of potato cultivars with the NL25 marker linked to the *Sen1* gene, where: M – marker weight; **1** – ‘Charodey’ (“+” control); **2** – ‘Lorkh’; **3** – ‘Snezhinka No. 3’; **4** – ‘Lyustdorfskaya’; **5** – ‘Korenevskiy’; **6** – ‘Moskovskiy’; **7** – ‘Igarskiy’ (seedling 101); **8** – water (“–” control). Diagnostic fragment size of the NL25 marker is 1400 bp

мент маркера NL25 обнаружен не был, поэтому для последующего SSR-профилирования в выборку старых отечественных сортов добавили образец WIR-78314 сорта 'Октябренок' из Гербария WIR (см. табл. 1).

Более сложный случай, хорошо иллюстрирующий трудности идентификации и поддержания старых селекционных сортов картофеля, выявлен при анализе хибинских сортов. Судя по литературным данным, сорт 'Хибины № 3' должен быть ракоустойчивым (Komarov, 1983), однако в молекулярном скрининге у образца к-830 сорта 'Хибины № 3' маркер гена *Sen1* не был обнаружен (см. табл. 2, обозначен **). Не исключено, что в данном случае могла произойти путаница с названиями сортов. Так, С. М. Букасов (Bukasov, 1959) отмечал, что сорт 'Хибины № 3' имеет два названия-синонима: 'Краснодарец' и 'Кубанец'. В то же время в более ранней работе М. А. Щибря (1954) упоминает, что название-синоним 'Кубанец' относится к сорту 'Хибинская Скороспелка', а название-синоним 'Краснодарец' относится к сорту 'Хибинский Двуурожайный' (Shchibrya, 1954). Таким образом, если комментарий С. М. Букасова справедлив, то микросателлитные профили образцов трех хибинских сортов ('Хибины № 3', 'Хибинский Двуурожайный', Хибинская Скороспелка') должны совпасть. Однако результаты нашего SSR-анализа (см. следующие разделы статьи) показали, что SSR-профили образцов 'Хибины № 3' (к-830) и 'Хибинский Двуурожайный' (вк-134) полностью совпадают, в то время как у образца 'Хибинская Скороспелка' (к-1590) выявлены генетические отличия. Отметим, что по литературным данным, сорта 'Хибинский Двуурожайный' и 'Хибинская Скороспелка' поражаются возбудителем рака картофеля (List No. 4…, 1956), у образцов этих сортов диагностический фрагмент маркера NL25 выявлен не был (см. табл. 2). Из-за такой сложной синонимики в названиях хибинских сортов мы затрудняемся сделать заключительный вывод о сортовой принадлежности этих образцов.

Молекулярный скрининг с маркером гена R1, контролирующего расоспецифичную устойчивость к фитофторозу

Начало активного использования в отечественной селекции межвидовых гибридов и селекционных клонов, созданных с участием мексиканского дикого вида *Solanum demissum* Lindl. – донора гена *R1*, можно отнести к середине XX века (Malcolmson, Black, 1966; Ross, 1986; Plaisted, Hoopes, 1989). Поэтому априори не ожидалось выявления большого числа старых советских сортов с маркером гена *R1*. Действительно, в изученной выборке образцов маркер R1 был выявлен только у двух сортов: 'Детскосельский' (к-2902) и 'Камераз 1' (к-1255), что согласуется с литературными данными об участии в их родословных межвидовых гибридов с *S. demissum* (Kostina, 1992; Van Berloo et al., 2007) (рис. 2), а также с данными других авторов о наличии у этих сортов маркера R1 (Beketova, Havkin, 2006).

Молекулярный скрининг сортов с маркерами гена H1

Как и ожидалось, ни у одного из 40 сортов изученной выборки не были выявлены маркеры гена *H1*, контролирующего устойчивость к патотипу Ro1 золотистой картофельной цистообразующей нематоды, поскольку активная селекция нематодоустойчивых сортов в нашей стране началась позднее – в 1970-х годах.

Результаты микросателлитного анализа

SSR-генотипирование

По результатам микросателлитного анализа был определен аллельный состав восьми локусов и проведено SSR-профилирование образцов старых сортов, сохраняемых на Полярной ОС ВИР, а также дублетных образцов (см. табл. 1). Индивидуальные SSR-профили получены для следующих 37 образцов: 'Апатит', 'Белоклубневый', 'Белоплет', 'Гуменючка', 'Гутнянка', 'Детскосельский', 'Заполярный', 'Злата', 'Игарский' (сеянец 101), 'Имандра', 'Камераз 1', 'Картофель Дарвина', 'Киселивка', 'Коллективный', 'Кореневский', 'Красный Костромской', 'Крестьянка Рединга', 'Кустистая Роза', 'Лорх', 'Люстдорфская', 'Московский', 'Октябренок' (WIR-78314), 'Подарок Родине', 'Свердловский', 'Сибиряк' (WIR-78482), 'Спутник' (23/524), 'Устьбез', 'Хамелеон', 'Хибинка', 'Хибинская Скороспелка', 'Хибинский Двуурожайный', 'Хибинский Морозостойкий', Элита 158, 'Якутский' (табл. 3).

Использование данных SSR-анализа для выявления дублетов и технических ошибок

В большинстве случаев результаты SSR-генотипирования старых сортов, сохраняемых на Полярной ОС ВИР, совпали с SSR-профилями образцов тех же сортов, сохраняемых в дублетных коллекциях, что подтверждает их генетическую идентичность. Микросателлитные профили двух сортов из полевой коллекции Полярной ОС ВИР – 'Детскосельский' и 'Смысловский' – совпали с одноименными образцами из Гербария WIR (согласно информации гербарных этикеток, образец WIR-80203 сорта 'Детскосельский' был собран в 1954 г., образец WIR-85292 сорта 'Смысловский' был собран и определен известным специалистом по генресурсам картофеля Л. И. Костиной). Также совпали SSR-профили одноименных образцов, сохраняемых в полевых коллекциях Полярной ОС ВИР и НПБ «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР», для следующих сортов: 'Имандра', 'Камераз 1', 'Кореневский', 'Красный Костромской', 'Крестьянка Рединга', 'Кустистая Роза', 'Лорх', 'Люстдорфская', 'Московский', 'Октябренок' (WIR-78314), 'Подарок Родине', 'Свердловский', 'Сибиряк' (WIR-78482), 'Спутник' (23/524), 'Устьбез', 'Хамелеон', 'Хибинка', 'Хибинская Скороспелка', 'Хибинский Двуурожайный', 'Хибинский Морозостойкий', Элита 158, 'Якутский' (табл. 3).

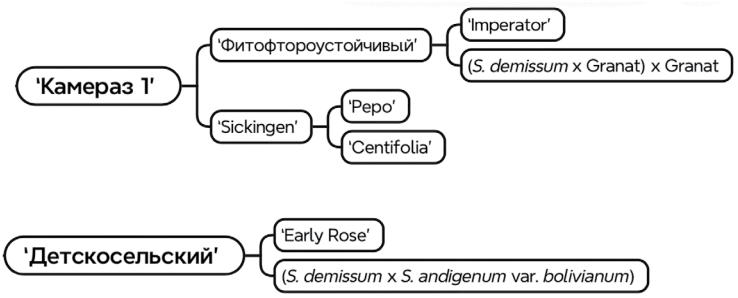


Рис. 2. Родословные сортов 'Камераз 1' и 'Детскосельский'
Fig. 2. Pedigrees of cvs. 'Kameraz 1' and 'Detskoselskiy'

Таблица 3. Микросателлитные профили 37 образцов старых сортов картофеля, сохраняемых на Полярной опытной станции ВИР

Table 3. Microsatellite profiles of 37 accessions of old potato cultivars maintained at the Polar Experiment Station of VIR

		STG0016								StI004							StI032						StI033						StI046									STM0037						STM2005					STM5114						
№	Название сорта	117	123	126	129	132	135	141	153	64	73	76	79	88	94	100	109	112	118	121	124	127	113	119	122	125	131	134	179	182	185	188	191	194	197	200	206	72	74	78	80	86	88	148	154	160	166	190	280	283	286	289	295	304	№
1	Апатит		■			■						■				■	■		■	■	■		■				■				■			■		■		■	■				■		■		■	■			■	■	■		1
2	Белоклубневый			■		■	■		■						■		■			■		■	■				■	■								■	■	■	■	■					■			■	■		■				2
3	Белоплет (16/67)					■	■		■			■	■			■	■		■	■			■	■			■					■	■			■	■	■	■		■						■			■	■		■		3
4	Гуменючка		■			■	■					■			■	■			■	■	■		■			■	■					■	■	■				■	■				■		■						■		■		4
5	Детскосельский					■	■		■			■		■			■	■		■	■		■				■	■					■	■		■		■			■	■					■		■		■		■		5
6	Заполярный					■		■				■			■	■	■				■	■	■				■						■		■								■		■	■	■				■	■	■		6
7	Злата				■	■			■			■		■	■		■		■	■	■		■			■	■	■		■			■				■	■			■	■			■		■				■		■		7
8	Игарский (сеянец 101)					■	■					■	■				■		■	■	■		■				■						■	■				■			■				■		■				■		■		8
9	Имандра		■			■	■	■				■			■					■	■	■	■			■							■	■	■					■			■		■	■	■				■	■	■		9
10	Камераз	■			■	■			■		■	■						■			■	■	■			■	■						■	■				■					■		■		■				■		■		10
11	Картофель Дарвина		■			■								■	■	■	■			■			■	■				■						■		■				■		■			■		■				■	■	■		11
12	Кинельский Богатырь		■				■		■			■		■						■	■	■	■				■						■	■		■		■	■		■				■		■		■		■		■		12
13	Киселивка		■			■	■								■	■			■		■	■	■					■					■	■			■	■				■	■		■		■				■		■		13
14	Коллективный		■		■	■	■					■		■			■			■			■	■				■			■		■				■	■		■	■	■			■				■				■		14
15	Кореневский					■						■			■	■			■	■	■	■	■	■			■			■				■		■		■					■					■				■		■		15
16	Красный Костромской		■		■	■						■			■		■				■		■				■						■	■			■		■	■	■	■			■			■	■		■		■		16
17	Крестьянка Рединга				■	■						■			■		■		■		■	■		■			■	■						■			■	■	■	■		■			■		■		■		■		■		17
18	Кустистая Роза				■	■	■					■				■	■		■	■		■	■				■						■	■				■	■		■	■			■		■	■			■		■		18
19	Лорх		■			■			■			■			■	■	■		■	■		■	■	■		■		■		■			■	■		■		■		■		■						■				■		■		19
20	Люстдорфская					■	■					■		■	■		■				■	■	■	■			■						■	■			■		■	■			■		■			■				■	■		20
21	Московский				■	■	■					■				■	■			■		■	■				■	■						■		■		■		■			■	-	-	-	-	-	■		■				21
22	Октябренок		■		■		■					■			■		■			■	■		■	■				■					■	■		■		■				■	■		■		■		■		■		■		22
23	Подарок Родине					■	■		■			■	■				■			■	■		■				■						■	■		■		■	■		■				■		■				■		■		23
24	Свердловский					■			■			■			■	■	■			■	■		■				■									■	■	■	■		■		■		■		■		■		■		■		24
25	Сибиряк (сеянец 36/15)		■			■	■		■			■			■	■	■		■	■			■	■									■			■	■			■	■	■			■						■		■		25
26	Скороспелка					■	■		■			■					■			■		■	■	■			■						■	■		■			■	■	■						■		■		■		■		26
27	Смысловский		■			■	■					■			■		■			■	■	■	■	■									■	■		■	■	■		■		■						■		■				■		27
28	Снежинка 3					■	■		■			■				■	■			■			■	■			■						■	■		■		■	■				■					■	■			■		■		28
29	Спутник		■			■			■			■			■	■	■			■		■	■				■						■	■		■		■		■								■					■	■		29
30	Устьбез					■	■					■		■	■					■	■		■				■						■	■		■	■			■	■		■		■					■		■		■		30
31	Хамелеон						■		■			■	■				■		■	■	■		■				■			■			■	■				■			■				■		■				■		■		31
32	Хибинка		■				■		■			■				■				■	■		■	■			■		■					■	■			■	■	■					■				■		■		■	■	32
33	Хибинская Скороспелка		■				■		■			■				■			■	■	■		■	■							■			■		■	■	■			■						■	■			■	■	■		33
34	Хибинский Двуурожайный		■			■	■								■	■					■	■	■				■				■			■			■	■				■					■				■	■			34
35	Хибинский Морозостойкий		■			■	■		■	■	■	■					■			■	■		■		■		■							■	■		■		■				■	■	■	■	■			■		■	■		35
36	Элита						■		■			■		■	■		■			■	■		■	■			■				■		■	■			■			■	■	■			■					■		■		■		36
37	Якутский							■	■			■				■	■			■	■		■				■						■	■		■	■	■	■		■				■		■				■		■		37
№	Название сорта	117	123	126	129	132	135	141	153	64	73	76	79	88	94	100	109	112	118	121	124	127	113	119	122	125	131	134	179	182	185	188	191	194	197	200	206	72	74	78	80	86	88	148	154	160	166	190	280	283	286	289	295	304	№
		STG0016								StI004							StI032						StI033						StI046									STM0037						STM2005					STM5114						

ский', а также образцов сорта 'Лорх', полученных из Полярной ОС ВИР и ФИЦ картофеля им. А.Г. Лорха (институт-оригинатор).

В то же время в нескольких случаях были выявлены несовпадения: обнаружены образцы с разными названиями, но одинаковыми SSR-профилями и, наоборот, одноименные образцы с разными профилями (см. табл. 1). Так, два образца с разными названиями из коллекции Полярной ОС ВИР имели одинаковые SSR-профили; это образец к-1044 'Драгоценность Агнелли' и образец к-1119 'Смысловский'. Отметим, что эти образцы не отличались между собой и по признакам световых ростков, форме и окраске кожуры клубня, которые соответствовали описанию сорта 'Смысловский' (литературные данные о морфологических признаках сорта 'Драгоценность Агнелли' найти не удалось). Форма венчика (гофрированная спайка долей венчика) у образца к-1119 с Полярной ОС ВИР также соответствовала известному описанию сорта 'Смысловский' (Zaytseva, 1950). Окончательное заключение о соответствии сорту 'Смысловский' образца к-1119, сохраняемому десятки лет в полевой коллекции Полярной ОС ВИР, было сделано после SSR-профилирования гербарного образца этого сорта – WIR-85292, который определила и собрала Л. И. Костина еще в 1966 г. на экспериментальном поле Пушкинских лабораторий ВИР (информация гербарной этикетки). Поскольку SSR-профили этого гербарного образца WIR-85292 и образца к-1119 сорта 'Смысловский' из полевой коллекции Полярной ОС ВИР совпали, то образец к-1044 'Драгоценность Агнелли' с совпадающим микросателлитным профилем можно рассматривать как результат технической ошибки. Также совпали микросателлитные профили образцов к-830 'Хибины № 3' (НПБ «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР») и вк-62 'Хибинский Двуурожайный' (Полярная ОС ВИР); сложная ситуация с синонимами хибинских сортов отмечалась выше.

В трех случаях ожидаемо не совпали SSR-профили следующих одноименных образцов:

(1) двух образцов сорта 'Сибиряк' (сеянец 36/15) – к-812 (Полярная ОС ВИР) и WIR-78482 (гербарный образец), различающихся по цвету венчика (см. выше);

(2) двух клонов образца к-2256 'Кинельский Богатырь', которые ранее куратор коллекции Полярной ОС ВИР обозначил индексами «А» и «Б», поскольку вариант «А» по цвету венчика отличался и от варианта «Б», и от описаний этого сорта;

(3) трех образцов сорта 'Октябренок', полученных из коллекций: Полярной ОС ВИР (венчик окрашен, не имеет маркера NL25 гена *Sen1* – см. выше), НПБ «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» (с белыми цветками) и Гербария WIR – образец WIR-78314 с окрашенным венчиком.

В результате проведенного комплексного изучения 39 образцов старых отечественных сортов, сохраняемых на Полярной ОС ВИР, включающего: верификацию сортоспецифичных морфологических признаков; молекулярный скрининг с маркерами генов, контролирующих устойчивость к ряду вредных организмов; сопоставление полученных результатов с имеющимися литературными и другими данными, а также микросателлитное профилирование этих образцов, размер исходной выборки был сокращен до 37 образцов (табл. 1, 3).

Верифицированная выборка из 37 образцов была использована в дальнейшем для изучения полиморфизма SSR-локусов старых отечественных сортов (табл. 4) и для анализа их генетических взаимосвязей (рис. 3).

Все изученные SSR-локусы оказались высокополиморфными. Число аллелей варьировало от пяти (STM2005) до девяти (StI046). В совокупности у 37 сортов было выявлено 53 SSR-аллеля размером от 64 пн (StI004) до 304 пн (STM5114). Индекс полиморфизма (PIC) варьировал от 0,643 (STM2005) до 0,822 (STM0037) (табл. 4). Отметим, что в выборке современных отечественных сортов, которая была генотипирована с тем же набором SSR-маркеров, уровень полиморфизма изученных локусов существенно не отличался (Antonova et al., 2020).

На дендрограмме выявлены только две пары сортов – 'Заполярный', 'Имандра' и 'Хамелеон', 'Игарский' (сеянец 101), кластеризация которых поддержана высокими значениями (70 <) бутстреп (рис. 3). Отметим, что эти две пары выделялись независимо от метода построения дендрограмм – NJ, UPGMA и Ward. При этом только для одной пары ('Заполярный', 'Имандра') совместное группирование можно объяснить данными родословных (рис. 4).

Таблица 4. Полиморфизм восьми SSR-локусов в выборке из 37 образцов старых сортов картофеля, сохраняемых на Полярной опытной станции ВИР

Table 4. Polymorphism of 8 SSR loci in a subset of 37 old potato cultivar accessions from the Polar Experiment Station of VIR

Локус	PIC	Размер аллельных фрагментов (пн)		Число не нулевых аллелей
		min	max	
STG0016	0,789	117	153	8
StI004	0,743	64	100	7
StI032	0,793	109	127	6
StI033	0,731	113	134	6
StI046	0,804	179	206	9
STM0037	0,822	72	88	6
STM2005	0,643	148	190	5
STM5114	0,709	280	304	6
Итого:				**53**

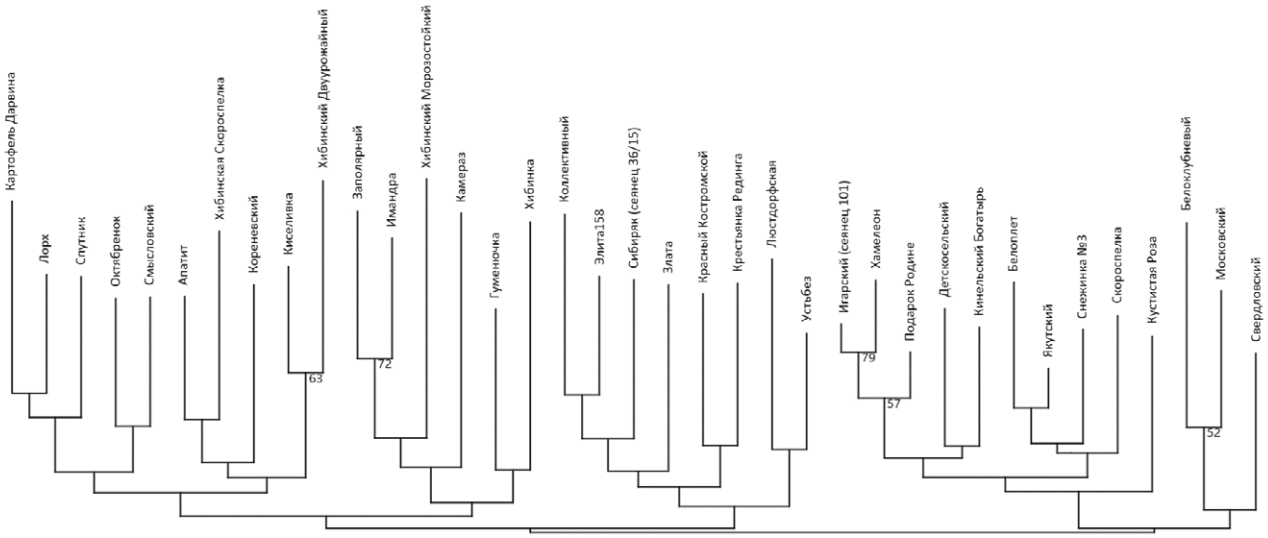


Рис. 3. Дендрограмма, построенная по данным SSR-генотипирования
(использован метод ближайшего соседа (NJ) на основе коэффициента Dice)

Fig. 3. Dendrogram constructed using SSR genotyping data
(the nearest neighbor-joining (NJ) method was used, based on the Dice coefficient)

Рис. 4. Родословные сортов 'Заполярный' и 'Имандра'

Fig. 4. Pedigrees of cvs. 'Zapolyarny' and 'Imandra'

В то же время для ряда других сортов, имеющих общие родительские формы (например, 'Кореневский' и 'Лорх'), совместной кластеризации не наблюдалась.

Заключение

Проведено комплексное изучение выборки, включавшей 39 образцов старых сортов картофеля, сохраняемых на Полярной опытной станции ВИР, большая часть которых была выведена в нашей стране в первой половине XX века, а также несколько зарубежных сортов, которые в этот период широко возделывались в Советском Союзе и/или участвовали в селекционных исследованиях советских селекционеров.

Данные молекулярного скрининга об отсутствии/наличии ряда ДНК-маркеров показали, что подавляющее число образцов имели генетические профили, характерные для старых сортов, созданных в конце XIX века – первой половине XX века. Так, все изученные сорта имели чилийский T-тип цитоплазмы, более половины из них (60%) не имели маркера NL25 гена *Sen1*, контролирующего устойчивость к возбудителю рака картофеля; 95% не имели маркера гена *R1* расоспецифичной устойчивости к возбудителю фитофтороза и ни один образец не имел маркеров гена *H1*, обуславливающего устойчивость к золотистой цистообразующей картофельной нематоде.

В результате проведенных исследований получены индивидуальные SSR-профили 37 старых отечественных сортов; данные SSR-анализа подтвердили генетическую идентичность большинства одноименных дублетных образцов. Полученные результаты подтверждают литературные данные о перспективах использования микросателлитного анализа для повышения эффективности традиционных методов верификации сортоспецифичных признаков и выявления дублетных образцов в биоресурсных коллекциях.

References / Литература

Anikina S.A., Vavilova M.A., Vasilyeva M.E., Kozeletskaya A.M. Potatoes in Murmansk Province (Kartofel v Murmanskoy oblasti). Murmansk; 1986. [in Russian] (Аникина С.А., Вавилова М.А., Васильева Е.М., Козелецкая А.М. Картофель в Мурманской области. Мурманск; 1986).

Antonova O.Yu., Klimenko N.S., Rybakov D.A., Fomina N.A., Zheltova V.V., Novikova L.Yu. et al. SSR analysis of modern Russian potato varieties using DNA samples of nomenclatural standards. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2020;3(4):77-96. [in Russian] (Антонова О.Ю., Клименко Н.С., Рыбаков Д.А., Фомина Н.А., Желтова В.В., Новикова Л.Ю. и др. SSR-анализ современных российских сортов картофеля с использованием ДНК номенклатурных стандартов. *Биотехнология и селекция растений*. 2020;3(4):77-96). DOI: 10.30901/2658-6266-2020-4-o2

Antonova O.Yu., Shvachko N.A., Kostina L.I., Malyshev L.L., Gavrilenko T.A. Genetic differentiation of potato vari-

eties using SSR markers. *Agrarian Russia*. 2004;(6):19-24. [in Russian] (Антонова О.Ю., Швачко Н.А., Костина Л.И., Малышев Л.Л., Гавриленко Т.А. Генетическая дифференциация сортов картофеля с использованием SSR-маркеров. *Аграрная Россия*. 2004;(6):19-24). DOI: 10.30906/1999-5636-2004-6-19-24

Antonova O.Yu., Shvachko N.A., Novikova L.Yu., Shuvalov O.Y., Kostina L.I., Klimenko N.S. et al. Genetic diversity of potato varieties bred in Russia and near-abroad countries based on polymorphism of SSR-loci and markers associated with resistance *R*-genes. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2016;20(5):596-606. [in Russian] (Антонова О.Ю., Швачко Н.А., Новикова Л.Ю., Шувалов О.Ю., Костина Л.И., Клименко Н.С. и др. Генетическое разнообразие сортов картофеля российской селекции и стран ближнего зарубежья по данным полиморфизма SSR-локусов и маркеров *R*-генов устойчивости. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2016;20(5):596-606). DOI: 10.18699/ VJ16.181

Beketova M.P., Khavkin E.E. The *R1* gene of late blight resistance in susceptible and resistant potato varieties. *Agricultural Biology*. 2006;41(3):109-114. [in Russian] (Бекетова М.П., Хавкин Э.Е. Ген *R1* устойчивости к фитофторозу у восприимчивых и устойчивых сортов картофеля. *Сельскохозяйственная биология*. 2006;41(3):109-114).

Bhardwaj V., Kumar A., Sharma S., Singh B., Poonam, Sood S. et al. Analysis of genetic diversity, population structure and association mapping for late blight resistance in potato (*Solanum tuberosum* L.) accessions using SSR markers. *Agronomy*. 2023;13(2):294. DOI: 10.3390/agronomy13020294

Bukasov S.M. 40 years of potato breeding in the USSR (40 let selektsii kartofelya v SSSR). In: *Agricultural Issues (Voprosy zemledeliya)*. Moscow; 1959. p.326-339. [in Russian] (Букасов С.М. 40 лет селекции картофеля в СССР. В кн.: *Вопросы земледелия*. Москва; 1959. С.326-339).

Bukasov S.M., Kameraz A.Ya., Lekhnovich V.S., Korneichuk V.A., Kostina L.A. Unified broad COMECON list of descriptors and international COMECON list of descriptors for potato species of the section *Tuberarium* (Dun.) Buk., genus *Solanum* L. (Shirokiy unifitsirovanny klassifikator SEV i mezhdunarodny klassifikator SEV vidov kartofelya sektsii *Tuberarium* (Dun.) Buk. roda *Solanum* L.). Leningrad: VIR; 1977. [in Russian] (Букасов С.М., Камераз А.Я., Лехнович В.С., Корнейчук В.А., Костина Л.А. Широкий унифицированный классификатор СЭВ видов картофеля секции *Tuberarium* (Dun.) Buk. рода *Solanum* L. Ленинград: ВИР; 1977).

Diekmann K., Seibt K.M., Muders K., Wenke T., Junghans H., Schmidt T. et al. Diversity studies in genetic resources of *Solanum* spp. (section *Petota*) by comparative application of ISAP markers. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2017;64(8):1937-1953. DOI: 10.1007/s10722-016-0484-y

Federal Research Center N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR): [website]. [in Russian] (Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР): [сайт]). URL: https://www.vir.nw.ru [дата обращения: 08.02.2026].

Feingold S., Lloyd J., Norero N., Bonierbale M., Lorenzen J. Mapping and characterization of new EST-derived microsatellites for potato (*Solanum tuberosum* L.). *Theoretical and Applied Genetics*. 2005;111(3):456-466. DOI: 10.1007/s00122-005-2028-2

Gavrilenko T.A., Antonova O.Yu., Kostina L.I. Study of genetic diversity in potato cultivars using PCR analysis of organelle DNA. *Russian Journal of Genetics*. 2007;43(11):1301-1305. DOI: 10.1134/S1022795407110130

Gavrilenko T.A., Klimenko N.S., Alpatieva N.V., Kostina L.I., Lebedeva V.A., Evdokimova Z.Z. et al. Cytoplasmic genetic diversity of potato varieties bred in Russia and FSU countries. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2019;23(6):753-764. DOI: 10.18699/VJ19.534

Gebhardt C., Bellin D., Henselewski H., Lehmann W., Schwarzfischer J., Valkonen J.P.T. Marker-assisted combination of major genes for pathogen resistance in potato. *Theoretical and Applied Genetics*. 2006;112(8):1458-1464. DOI: 10.1007/s00122-006-0248-8

Ghebreslassie B.M., Githiri S.M., Mehari T., Kasili R.W., Ghislain M., Magembe E. Genetic diversity assessment of farmers' and improved potato (*Solanum tuberosum*) cultivars from Eritrea using simple sequence repeat (SSR) markers. *African Journal of Biotechnology*. 2016;15(35):1883-1891. DOI: 10.5897/AJB2016.15237

Ghislain M., Nuñez J., del Rosario Herrera M, Pignataro J.D., Guzman F., Bonierbale M. et al. Robust and highly informative microsatellite-based genetic identity kit for potato. *Molecular Breeding*. 2009;23(3):377-388. DOI: 10.1007/s11032-008-9240-0

Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological statistics software. Package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*. 2001;4(1):1-9. Available from: http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/past.pdf [accessed Sep. 08, 2025].

Hosaka K., Sanetomo R. Development of a rapid identification method for potato cytoplasm and its use for evaluating Japanese collections. *Theoretical and Applied Genetics*. 2012;125(6):1237-1251. DOI: 10.1007/s00122-012-1909-4

Ivanova-Pozdejeva A., Kivistik A., Kübarsepp L., Tähtjärv T., Tsahkna A., Droz E. et al. Fingerprinting of potato genotypes from Estonian genebank collection using SSR markers. *Potato Research*. 2022;65(1):153-170. DOI: 10.1007/s11540021-09514-z

Komarov V.I., Zholudeva E.P., Kostina L.I., Shinkarev V.I. (comp.). Catalogue of the VIR global collection. Issue 382. Potato (Kartofel). K.Z. Budin (ed.). Leningrad: VIR; 1983. [in Russian] (Каталог мировой коллекции ВИР. Выпуск 382. Картофель / сост. В.И. Комаров, З.П. Жолудева, Л.И. Костина, В.И. Шинкарев; под ред. К.З. Будина. Ленинград: ВИР; 1983).

Kostina L.I. Selection of source material for potato breeding based on genealogy (guidelines) (Vydeleniye iskhodnogo materiala dlya selektsii kartofelya na osnove genealogii [metodicheskiye ukazaniya]). Leningrad: VIR; 1992. [in Russian] (Костина Л.И. Выделение исходного материала для селекции картофеля на основе генеалогии (методические указания). Ленинград: ВИР; 1992).

Kostina L.I., Kosareva O.S. Genealogy of domestic potato cultivars (Genealogiya otechestvennykh sortov kartofelya). St. Petersburg: VIR; 2017. [in Russian] (Костина Л.И., Косарева О.С. Генеалогия отечественных сортов картофеля. Санкт-Петербург: ВИР; 2017).

LI-COR. Environmental monitoring for data-driven insight: [website]. Available from: https://www.licor.com [accessed Feb. 08, 2026]

List No. 4 of wart-resistant and wart-susceptible potato cultivars and seedlings according to the data of state trials (Spisok № 4 ustoychivykh k raku sortov i seyantsev kartofelya i vospriimchivykh sortov po dannym gosudarstvennogo sortoispytaniya). All-Union Research Station for Potato Wart of the All-Union Research Institute of Plant Protection; 1956. [in Russian] (Список № 4 устойчивых к раку

сортов и сеянцев картофеля и восприимчивых сортов по данным государственного испытания. Всесоюзная научно-исследовательская станция по раку картофеля Всесоюзного научно-исследовательского института защиты растений; 1956).

List No. 5 of wart-resistant and wart-susceptible potato cultivars and seedlings according to the data of state trials (Spisok № 5 ustoychivykh k raku sortov i seyantsev kartofelya i vospriimchivykh sortov po dannym gosudarstvennogo sortoispytaniya). All-Union Research Station for Potato Wart of the All-Union Research Institute of Plant Protection; 1958. [in Russian] (Список № 5 устойчивых к раку сортов и сеянцев картофеля и восприимчивых сортов по данным государственного испытания. Всесоюзная научно-исследовательская станция по раку картофеля Всесоюзного научно-исследовательского института защиты растений; 1958).

List No. 6 of wart-resistant and wart-susceptible potato cultivars and seedlings according to the data of state trials (Spisok № 6 ustoychivykh k raku sortov i seyantsev kartofelya i vospriimchivykh sortov po dannym gosudarstvennogo sortoispytaniya). All-Union Research Station for Potato Wart of the All-Union Research Institute of Plant Protection; 1964. [in Russian] (Список № 6 устойчивых к раку сортов и сеянцев картофеля и восприимчивых сортов по данным государственного испытания. Всесоюзная научно-исследовательская станция по раку картофеля Всесоюзного научно-исследовательского института защиты растений; 1964).

Malcolmson J.F., Black W. New *R* genes in *Solanum demissum* Lindl. and their complementary races of *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary. *Euphytica*. 1966;15:199-203. DOI: 10.1007/BF00022324

Milbourne D., Meyer R.C., Collins A.J., Ramsay L.D., Gebhardt C., Waugh R. Isolation, characterisation and mapping of simple sequence repeat loci in potato. *Molecular and General Genetics*. 1998;259(3):233-245. DOI: 10.1007/s004380050809

Mori K., Sakamoto Y., Mukojima N., Tamiya S., Naka T., Ishii T. et al. Development of a multiplex PCR method for simultaneous detection of diagnostic DNA markers of five disease and pest resistance genes in potato. *Euphytica*. 2011;180(3):347-355. DOI: 10.1007/s10681-011-0381-6

Nagel M., Dulloo M.E., Bissessur P., Gavrilenko T., Bamberg J., Ellis D., Giovannini P. A global strategy for the conservation of potato. Bonn: Global Crop Diversity Trust; 2022. DOI: 10.5447/ipk/2022/29

Plaisted R.L., Hoopes R.W. The past record and future prospects for the use of exotic potato germplasm. *American Potato Journal*. 1989;66(10):603-627. DOI: 10.1007/BF02853982

Reid A., Hof L., Felix G., Rücker B., Tams S., Milczynska E. et al. Construction of an integrated microsatellite and key morphological characteristic database of potato varieties on the EU Common Catalogue. *Euphytica*. 2011;182(2):239-249. DOI: 10.1007/s10681-011-0462-6

Ross H. Potato breeding: problems and perspectives. In: W. Horn, G. Robbelen (eds). *Journal Plant Breeding Supplement. Vol. 13*. Berlin: Paul Parey; 1986. p. 82-86.

Sanetomo R., Gebhardt C. Cytoplasmic genome types of European potatoes and their effects on complex agronomic traits. *BMC Plant Biology*. 2015;15:162. DOI: 10.1186/s12870-015-0545-y

Schultz L., Cogan N.O.I., McLean K., Dale M.F.B., Bryan G.J., Forster J.N.W. et al. Evaluation and implementation of a potential diagnostic molecular marker for H1-conferred potato cyst nematode resistance in potato (*Solanum tuberosum* L.). *Plant Breeding*. 2012;131(2):315-321. DOI: 10.1111/j.1439 0523.2012.01949.x

Shchibrya M.A. Double-crop potato cultivars (Dvukhurozhaynye sorta kartofelya). In: I.S. Sidorova (ed.). *Collection of Achievements of Scientific Institutions of Krasnodar Territory*. *Issue 2 (Sbornik dostizheniy nauchnykh uchrezhdeniy Krasnodarskogo kraya. Vypusk 2)*. Krasnodar; 1954. p.168-171. [in Russian] (Щибря М.А. Двухурожайные сорта картофеля. В кн.: *Сборник достижений научных учреждений Краснодарского края. Выпуск 2* / под ред. И.С. Сидоровой. Краснодар; 1954. С.168-171).

Shvachko N.A. Genetic diversity of potato cultivars in the VIR collection identified by the SSR analysis (Geneticheskoye raznoobraziye selektsionnykh sortov kartofelya kollektsii VIR, vyyavlennoye SSR analizom) [dissertation]. St. Petersburg: VIR; 2012. [in Russian] (Швачко Н.А. Генетическое разнообразие селекционных сортов картофеля коллекции ВИР, выявленное SSR анализом: дис. … канд. биол. наук. Санкт-Петербург: ВИР; 2012).

Takeuchi T., Sasaki J., Suzuki T., Horita H., Hiura S., Iketani S. et al. DNA markers for efficient selection of disease and pests resistance genes in potato. In: *Hokkaido Nogyo-Shiken-Kaigi-Shiryo 2008*. Tsukuba: NARO; 2009. p.1-26. [in Japanese]

Travina S.N. Polar Experiment Station of VIR: the northernmost outpost of potato research. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2020;181(1):139-145. [in Russian] (Травина С.Н. Полярная опытная станция ВИР – северный форпост исследований картофеля. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2020;181(1):139-145). DOI: 10.30901/2227-8834-2020-1-139-145

Van Berloo R., Hutten R.C.B., van Eck H.J., Visser R.G.F. An online potato pedigree database resource. *Potato Research*. 2007;50(1):45-57. DOI: 10.1007/s11540-007-9028-3

Zaytseva N.D. Identification key to potato cultivars (Opredelitel sortov kartofelya). Moscow: State Publishers of Agricultural Literature; 1950. [in Russian] (Зайцева Н.Д. Определитель сортов картофеля. Москва: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы; 1950).

Zaytseva N.D. Identification key to wart-resistant potato cultivars (Opredelitel rakoustoychivykh sortov kartofelya), Moscow: State Publishers of Agricultural Literature; 1953. [in Russian] (Зайцева Н.Д. Определитель ракоустойчивых сортов картофеля. Москва: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы; 1953).

Zaytseva N.D. Works of the Research Institute of Potato Farming. Issue VII. Description of potato cultivars that participated in the State Variety Trials (Opisaniye sortov kartofelya, uchastvovavshikh v gosudarstvennom sortoispytanii). Moscow: Selkhozgiz; 1935. [in Russian] (Зайцева Н.Д. Работы научно-исследовательского института картофельного хозяйства. Выпуск VII. Описание сортов картофеля, участвовавших в государственном сортоиспытании. Москва: Сельхозгиз; 1935).

Zaytseva N.D., Maksimova S.A., Chernikova M.F. The best potato cultivars (Luchshiye sorta kartofelya). Moscow: Kolos; 1975. [in Russian] (Зайцева Н.Д., Максимова С.А., Черникова М.Ф. Лучшие сорта картофеля. Москва: Колос; 1975).

Информация об авторах

Даниил Александрович Рыбаков, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, da-rybakov@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0003-1520-0219

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

Светлана Николаевна Травина, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Полярная опытная станция – филиал ВИР, 184209 Россия, Мурманская область, Апатиты, ул. Козлова, 2а, swetusic@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6986-6353

Ольга Сергеевна Косарева, 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, os_kosareva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0151-8349

Татьяна Андреевна Гавриленко, 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, tatjana9972@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-2605-6569

Information about the authors

Daniil A. Rybakov, Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, da-rybakov@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0003-1520-0219

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

Svetlana N. Travina, Cand. Sci. (Biology), Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Polar Experiment Station – branch of VIR, 2a Kozlova St., Apatity, Murmansk Province 184209, Russia, swetusic@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6986-6353

Olga S. Kosareva, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, os_kosareva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0151-8349

Tatjana A. Gavrilenko, Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, tatjana9972@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-2605-6569

Вклад авторов: Рыбаков Д. А. – поиск литературных данных о происхождении и морфологических признаках сортов выборки; фенотипирование и фотодокументация образцов; верификация морфологических признаков; SSR-анализ; молекулярный скрининг; анализ полученных результатов; участие в подготовке рукописи. Антонова О. Ю. – SSR-генотипирование; молекулярный скрининг; анализ данных молекулярно-генетического анализа. Травина С. Н. – предоставление образцов, сохраняемых в полевой коллекции Полярной ОС ВИР и информации о происхождении и морфологических признаках этих образцов, а также фотографий соцветий и цветков изучаемых образцов. Косарева О. С. – предоставление образцов сохраняемых в полевой коллекции НПБ «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» и информации о происхождении и морфологических признаках сортов выборки. Гавриленко Т. А. – концептуализация; планирование и руководство исследованиями; анализ полученных результатов; подготовка рукописи.
Contribution of the authors: Rybakov D. A. – search for published data on the origin and morphological traits of the cultivars; phenotyping and photographic documentation of accessions; verification of morphological traits; SSR analysis; molecular screening; analysis of the obtained results; participation in the preparation of the manuscript. Antonova O. Yu. – SSR genotyping; molecular screening; analysis of the molecular genetic analysis data. Travina S. N. – provision of accessions preserved in the field collection of the Polar Experiment Station of VIR and information on the origin and morphological traits of these accessions, as well as photos of inflorescences and flowers of the studied accessions. Kosareva O. S. – provision of accessions preserved in the field collection of Pushkin and Pavlovsk Laboratories of VIR and information on the origin and morphological traits of the sampled cultivars. Gavrilenko T. A. – conceptualization; planning and supervision of the research; analysis of the obtained results; preparation of the manuscript.

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

Статья поступила в редакцию 13.02.2026; одобрена после рецензирования 17.04.2026; принята к публикации 06.05.2026.
The article was submitted on 13.02.2026; approved after reviewing on 17.04.2026; accepted for publication on 06.05.2026.

МОБИЛИЗАЦИЯ И СОХРАНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 58.009:633.2
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o16

CC BY

Типологическая характеристика и продуктивность луговых экосистем УНПУ «Оёкское» Предбайкалья

Е. Г. Худоногова, С. В. Половинкина

Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского, Иркутская область, Россия

Автор, ответственный за переписку: Елена Геннадьевна Худоногова, doky2015@yandex.ru

Актуальность. В настоящее время улучшению природных кормовых угодий уделяется недостаточное внимание, что приводит к постепенному переходу сенокосов в пастбища и их последующей деградации. Это сопровождается снижением продуктивности и изменением видового состава кормовых угодий. Многие хозяйства компенсируют нехватку кормов преимущественно за счет маловидовых сеяных сенокосов и пастбищ, которые не способны в полной мере заменить естественные природные угодья ни по видовому богатству и разнообразию, ни по содержанию биологически активных веществ и кормовой продуктивности.
Материалы и методы. Геоботанические исследования проводились в 2017–2023 гг. на территории учебного научно-производственного участка «Оёкское» – учебной и производственной исследовательской базе Иркутского государственного аграрного университета. Кормовые угодья изучали с использованием общепринятой инструкции по проведению геоботанического обследования природных кормовых угодий.
Результаты и выводы. На территории исследования выделены два класса луговых экосистем (низинные, западинные луговые понижения, краткопоемные луга прирусловой и центральной поймы) и класс болотных экосистем. Площадь луговых экосистем составляет 4235,9 га (14,54% от общей территории исследования), из которых 14,2% (602,1 га) занимают сенокосы и 85,8% (3633,8 га) – пастбища. Продуктивность кормовых угодий составляет 7,1–12,6 ц/га (сухой поедаемой массы – 5,8–10,0 ц/га) (возд.-сух.). Поверхностное улучшение рекомендовано для суходольных и краткопоемных лугов, сильнозакустаренные среднепоемные, низинные и болотные луга нуждаются в коренном улучшении.

Ключевые слова: кормовые растения, луга, фитоценозы, урожайность, Иркутская область

Благодарности: работа выполнена в рамках НИОКТР РФ «Эффективное использование луговых экосистем в условиях Предбайкалья как кормовой базы молочного и мясного животноводства» (№ 122030400446-8 от 05.03.2022).

Для цитирования: Худоногова Е.Г., Половинкина С.В. Типологическая характеристика и продуктивность луговых экосистем УНПУ «Оёкское» Предбайкалья. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(2):35-46. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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.

© Худоногова Е.Г., Половинкина С.В., 2026

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

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o16

Typological characteristics and productivity of meadow ecosystems in the Oyokskoe Educational, Research and Production Farm, Cis-Baikal region

Elena G. Khudonogova, Svetlana V. Polovinkina

Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, Irkutsk Province, Russia

Corresponding author: Elena G. Khudonogova, doky2015@yandex.ru

Background. By now, insufficient attention has been paid to natural forage land reclamation. This situation has led to the gradual conversion of hayfields into pastures and their subsequent degradation, accompanied by a decrease in the productivity of forage lands, a change in the species composition, etc. Many farms counterbalance feed shortages mostly with species-poor seeded hayfields and pastures, but these are unable to fully replace natural rangelands either in species richness and diversity or in the availability of bioactive compounds and feed productivity.
Materials and methods. Geobotanical studies were conducted in 2017–2023 over the territory of the Oyokskoe Educational, Research and Production Farm, affiliated to Irkutsk State Agrarian University. The forage lands were surveyed using the conventional guidelines for a geobotanical study of natural rangelands.
Results and conclusions. Two classes of meadow ecosystems were identified within the target area (lowland meadow microdepressions, and short-flooded meadows of the riverbed and central floodplain), as well as one class of marsh ecosystems. The area under meadow ecosystems is 4235.9 hectares (14.54% of the total target area), of which 14.2% is occupied by hayfields (602.1 ha), and 85.8% by pastures (3633.8 ha). The productivity of forage lands is 0.71–1.26 t/ha (0.58–1.00 t/ha consumable air-dry weight). Surface improvement is recommended for dry and short-flooded meadows. Densely shrub-encroached medium-flooded, lowland, and marshy meadows require fundamental improvement.

Keywords: forage plants, meadows, phytocenoses, yield, Irkutsk Province

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the Russian Federation R&D Project “Efficient use of meadow ecosystems in the Cis-Baikal region as a feed base for dairy and beef cattle farming” (No. 122030400446-8 of March 05, 2022).

For citation: Khudonogova E.G., Polovinkina S.V. Typological characteristics and productivity of meadow ecosystems in the Oyokskoe Educational, Research and Production Farm, Cis-Baikal region. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(2):35-46. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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

Луговые экосистемы являются основной кормовой базой и источником полноценного натурального корма для сельскохозяйственных животных. В луговых травах содержатся протеин, ненасыщенные жирные кислоты (линолевая, арахидоновая, линоленовая), витамины, микро-, макроэлементы и другие ценные вещества, многие из которых могут служить для профилактики различных болезней сельскохозяйственных животных.

Из-за недостатка или полного отсутствия мероприятий по улучшению природных кормовых угодий, ежегодного неконтролируемого выпаса сельскохозяйственных животных на одном и том же месте природные сенокосы постепенно переводятся в пастбища на большей части территории, снижается их продуктивность, из состава травостоя выпадают ценные кормовые растения, постепенно они заменяются малоценными в кормовом отношении видами. Данные аспекты в совокупности обуславливают необходимость изучения современного состояния луговых экосистем как основы ценных и питательных кормов для обеспечения кормовой базы молочного и мясного животноводства.

Вопросам изучения кормовых угодий посвящены работы многих исследователей. Так, закономерность изменения устойчивости пастбищных кормовых трав при стрессовых факторах и их эколого-биологические особенности изучались в Прикаспийском институте биологических ресурсов. Авторы пришли к выводу о том, что растительные сообщества на территории Терско-Кумской низменности находятся в состоянии деградации, а кормовые угодья нуждаются в разработке мероприятий по их улучшению и использованию (Babaeva, Osipova, 2021). Обзор современного состояния кормопроизводства представлен в работе сотрудников Федерального исследовательского центра «Немчиновка». Авторы рассмотрели возможность использования цифрового формата для сбора данных продуктивности агроценозов (Blagoveshchensky et al., 2019). Вопросам улучшения сенокосов в условиях Московской области посвящена работа С. А. Запивалова. Автор изучил влияние различных доз удобрений на ботанический состав и качество корма, выявил, что после второго укоса облиственность побегов злаков повышается, а процент содержания бобовых трав увеличивается (Zapivalov, 2021). На основе исследований по рекультивации деградированных пастбищных угодий в условиях Алтайского края разработаны мероприятия по улучшению деградированных пастбищ с использованием ассортимента кормовых трав семейства Бобовые (Korniyevskaya, Silantyeva, 2017; Syeva et al., 2021).

Комплексные исследования по изучению природных кормовых угодий в Предбайкалье на базе учебного научно-производственного участка «Оёкское» (УНПУ «Оёкское») были проведены в 1976–1977 гг. сотрудниками Иркутского сельскохозяйственного института по заданию Производственного управления сельского хозяйства Иркутской области, а также в 1989 г. сотрудниками института Востсибгипрозем (Восточно-Сибирский государственный филиал проектного института по землеустройству). Исследования по изучению кормовых угодий Иркутского района возобновлены с 2017 г. (через 28 лет) сотрудниками Иркутского государственного аграрного университета (Иркутского ГАУ) (Mikhlyaeva, Khudonogova, 2018; Khudonogova et al., 2019).

Цель исследования – изучение типологических особенностей и продуктивности кормовых угодий луговых экосистем как основной кормовой базы молочного и мясного животноводства в условиях УНПУ «Оёкское» Иркутского ГАУ.

Материалы и методы

УНПУ «Оёкское» Иркутского ГАУ расположен на территории Иркутского района Иркутской области. Участок был создан на базе вуза в советский период в качестве учебной и производственной научно-исследовательской базы для обучения студентов, подготовки аспирантов и проведения научно-исследовательских работ преподавателями агрономического факультета.

Объект исследования – природные кормовые угодья луговых экосистем УНПУ «Оёкское» Иркутского района. Территория УНПУ «Оёкское» составляет 29 139 га, из которых площадь кормовых угодий луговых экосистем – 4235,9 га.

Геоботанические исследования проведены авторами с 2017 г. по 2025 г. на территории УНПУ «Оёкское» Иркутского района. Кроме того, были использованы архивные материалы Иркутского ГАУ: данные почвенного обследования (1985 г.), карты сельскохозяйственных угодий (1988 г.), топографическая карта (2011 г.), ортофотопланы (2008 г.), данные навигаторов Garmin Dacota 20 и Garmin Etrex 20x, а также типовые методики описания формаций и ассоциаций растительных сообществ (Mirkin, Rosenberg, 1978; Mirkin, 1985; Kutuzova et al., 1996).

Типологическая классификация кормовых угодий луговых экосистем выполнена на основе 233 геоботанических описаний в соответствии с типовыми рекомендациями «Общесоюзной инструкции по проведению геоботанического обследования природных кормовых угодий» (принципы типизации исследованных кормовых угодий см. в примечании к таблице 1) (Istomin, 1984). Описания проводили на площадках 100 м^2 в 6–10-кратной повторности, при этом выделяли формации и ассоциации, основные виды растительных сообществ, площадь и продуктивность растительных сообществ. Урожайность сенокосов и пастбищ определяли типовым укосным методом в 4-кратной повторности (Istomin, 1984). Обработку собранного растительного материала проводили методом сортировки (Tishchenko, Korolyuk, 2020). Для описания культуртехнического состояния выбирали площадку размером 500–1000 м^2 с характерными показателями, количеством, соотношением и особенностями размещения преобладающего вида (видов) в пределах одного типа при условии многократной проверки (не менее 10 раз) (Istomin, 1984).

Номенклатура растений приведена в соответствии с конспектом флоры В. В. Чепиноги, Н. В. Степанцовой, А. В. Гребенюк и др. (Chepinoga et al., 2008).

Статистическая обработка экспериментальных данных (продуктивности) проведена с использованием программы Statistica, MS Excel 97.

Результаты и их обсуждение

Учебный научно-производственный участок Иркутского ГАУ (УНПУ) «Оёкское» – лесостепной район, занимает юг Среднесибирского плоскогорья Иркутской впадины Присаянского краевого прогиба. Главной водной артерией территории является р. Куда вместе с притоками (р. Оёк, р. Кот, руч. Мара, р. Котик). По надпойменным террасам и склонам расположены природные сенокосы и пастбища (высота над уровнем моря – 450–650 м). Река

Оёк проходит через центральную часть территории УНПУ «Оёкское». Оводнение на большей части территории достаточное для водопоя и полива.

Район исследования характеризуется резко континентальным климатом (от +35°С в июле до –50°С в январе), осадков в год выпадает в среднем 300–400 мм. Почвы разнообразные – серые лесные, дерново-подзолистые, выщелоченные черноземы, в поймах рек – луговые, иногда солончаковатые, в низинах – перегнойно-торфянистые и др. (pH = 6,5–8). Залесенность территории – 30–35%. Из древесной растительности на изученной территории господствуют сосняки с березой плосколистной и осиной.

Эколого-фитоценотические особенности и классификация типологического состава кормовых угодий луговых экосистем УНПУ «Оёкское» приведены в таблице 1. В результате проведенных исследований, в соответствии с типовыми рекомендациями «Общесоюзной инструкции по проведению геоботанического обследования природных кормовых угодий» (Istomin, 1984), выделены следующие классы и подклассы.

1. **Класс С-4** – низинные, западинные луговые понижения. Площадь – 1583,7 га:

– подкласс С-4а – злаково-разнотравные остепненные луга (занимают площадь 64,3 га). Остепненные суходольные луга включают злаково-разнотравные растительные сообщества с мятликами – мятлик узколистный (*Poa angustifolia* L.), м. оттянутый (*P. attenuata* Trin.), тимофеевкой степной (*Phleum phleoides* (L.) Karst), житняком гребенчатым (*Agropyron cristatum* (L.) P. Beauv.) и осокой твердоватой (*Carex duriuscula* С.А. Мey). Эти луга распространены по водоразделам, в том числе на месте бывшего леса; они характеризуются господством в травостое ксеромезофитов и мезофитов, увлажнение атмосферное, нормальное, временами недостаточное. Почвы серые лесные, дерново-луговые, выщелоченные черноземы. Микрорельеф мелкобугристо-западинный, участки рядом с населенными пунктами сбитые. Часть территории закустарена или залесена. Проективное покрытие травостоем – 60–70%

В составе травостоя – мятлик узколистный (*Poa angustifolia*), мятлик оттянутый (*P. attenuata*), тимофеевка степная (*Phleum phleoides*), пырей ползучий (*Elytrigia repens* (L.) Nevski), овсяница ленская (*Festuca lenensis* Drobow), кострец безостый (*Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub), колосняк китайский (*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvelev), житняк гребенчатый (*Agropyron cristatum*), осока твердоватая (*Carex duriuscula*), о. стоповидная (*C. pediformis* С.А. Мey.), люцерна серповидная (*Medicago falcate* L.), горошек приятный (*Vicia amoena* Fisch.), лапчатка пижмолистная (*Potentilla tanacetifolia* Willd. ex Schlecht.), земляника зеленая (*Fragaria viridis* Duchesne), вероника седая (*Veronica incana* L.), нивяник обыкновенный (*Leucanthemum vulgare* Lam.) и др. Продуктивность сена колеблется от 7,4 до 13,9 ц/га, сухой поедаемой массы – от 6,2 до 12,7 ц/га (возд.-сух.). Улучшение суходольных лугов проводилось в 70-х, 80-х годах XIX века, на части изучаемой территории был осуществлен подсев злаково-бобовой травосмеси. В настоящее время большинство этих лугов нуждаются в мероприятиях по улучшению: часть подлежат коренному улучшению, другая часть – поверхностному.

– подкласс С-4б – злаково-разнотравные и злаково-осоковые влажные и сырые низинные луга объединяют безостокострецово-разнотравные, гигантскополевицево-осоковые, луговолисохвостно-осоковые, луговоовсяницево-разнотравные растительные сообщества (занимают площадь 1009,8 га). Низинные луга распространены по неглубоким западинам и падям, увлажнение атмосферное, грунтовое и натечное, нормальное, реже временно-избыточное. Преобладающие почвы – луговые и дерново-луговые. Микрорельеф мелкобугристо-западинный. Проективное покрытие травостоем – 70–75%. В травостое присутствуют кострец безостый (*Bromopsis inermis*), мятлик луговой (*Poa pratensis* L.), овсяница луговая (*Schoenodorus pratensis* (Huds.) P. Beauv.), пырей ползучий (*Elytrigia repens*), лесное и луговое разнотравье. По более глубоким западинам произрастают полевица гигантская (*Agrostis gigantea* Roth), лисохвост луговой (*Alopecurus pratensis* L.), осока дернистая (*Carex cespitosa* L.), о. безжилковая (*C. enervis* С.А. Мey.) и др., местами встречаются вредные и ядовитые растения – хвощ луговой (*Equisetum pratense* Ehrh.), купальница азиатская (*Trollius asiaticus* L.), прострел раскрытый (*Pulsatilla patens* (L.) Mill.), борец бородатый (*Aconitum barbatum* Pers.), ветреница лесная (*Anemone sylvestris* L.), лютик близкий (*Ranunculus propinquus* С.А. Мey.). Низинные луга относятся к хорошим сенокосам и пастбищам, но на части территории они закустарены или залесены. Продуктивность сена составляет 6,0–20,5 ц/га (5,1–17,7 ц/га сухой поедаемой массы) (возд.-сух.). Боронование и внесение удобрений можно рекомендовать для улучшения низинных лугов, коренному улучшению подлежат средне- и сильносбитые кормовые угодья.

– подкласс С-4в – злаковые и разнотравно-злаковые влажные и сырые луга на засоленных почвах (занимают площадь 509,6 га) объединяют разнотравно-луговоовсяницевые, разнотравно-гигантскополевицевые, разнотравно-безжилковоосоковые, злаково-гусинолапчатковые растительные сообщества, встречаются по пониженным элементам водоразделов, занимают ложбины, доминируют на луговых почвах, местами приурочены к луговым солонцам. Увлажнение атмосферно-грунтовое, натечное. Микрорельеф мелкобугристо-западинный, местами – гусинолапчатковый сбой. Проективное покрытие травостоем – 60–70%. В травостое произрастают полевица гигантская (*Agrostis gigantea*), овсяница луговая (*Schoenodorus pratensis*), лисохвост луговой (*Alopecurus pratensis*), с различным обилием встречаются вейник Лангсдорфа (*Calamagrostis langsdorffii* (Link) Trin.), критезион короткоостистый (*Critesion brevisubulatum* (Trin.) A. Löve), ситник (*Juncus* L.), подорожник большой (*Plantago major* L.), лебеда сибирская (*Atriplex sibirica* L.), амория ползучая (*Amoria repens* (L.) C. Presl) и др. Продуктивность сена – 3,5–12 ц/га, сухой поедаемой массы – 5,5–11,8 ц/га (возд.-сух.). После осушения и коренного улучшения даже без полива низинные луга могут быть высокоурожайными лугами.

2. **Класс С-5** – краткопоемные луга прирусловой и центральной поймы (пойменные луга). Площадь составляет 1084,7 га:

– подкласс С-5б – злаково-разнотравные влажные и сырые луга занимают площадь 395 га. Краткопоемные луга прирусловой и центральной поймы представлены безостокострецово-разнотравными, злаково-осоково-разнотравными, луговоовсяницево-разнотравными, гигантскополевицево-разнотравными, безостокостецово-луговомятликово-разнотравными растительными сообществами, местами эти луга закустарены. Краткопоемные луга занимают повышенные, хорошо дренированные поймы рек и сухие гривы. Увлажнение атмосферное, грунтовое, натечное, нормальное или временно-избы-

Таблица 1. **Эколого-фитоценотические особенности, типологическая характеристика и продуктивность кормовых угодий луговых экосистем УНПУ «Оёкское»**
Table 1. **Ecological and phytocenotic features, typological characteristics, and productivity of forage lands within meadow ecosystems of the Oyokskoe Educational, Research and Production Farm**

Подкласс	Наименование типов и модификаций	Рельеф	Увлажнение	Почва	Обилие основных видов	Продуктивность, ц/га (возд.-сух.), M ± m	
						сена	сух. поедаемой массы
Класс С-4 – низинные, западинные луговые понижения							
С-4а – злаково-разнотравные остепненные луга	Мятликово-разнотравные, степнотимофеевково-разнотравные, гребенчатожитняково-разнотравные, твердоватоосоково-разнотравные, злаково-разнотравные по редколесью	По водоразделам, по склонам 2–15°, неглубоким западинам водоразделов	Атмосферное, нормальное, временами недостаточное	Дерново-луговые, серые лесные, темно-серые лесные, лугово-черноземные выщелоченные	*Poa angustifolia* – sp-cop$_1$, *P. attenuate* – sp-cop$_1$, *Phleum phleoides* – sp-cop$_1$, *Agropyron cristatum* – sp-cop$_1$, *Carex duriuscula* – sp-cop$_1$, *C. pediformis* – sol-sp, *Bromopsis inermis* – sp, *Festuca lenensis* – sp, *Elytrigia repens* – sp, *Leymus chinensis* – sol-sp, *Vicia amoena* – sp, *Medicago falcate* – sp, *Potentilla tanacetifolia* – sol-sp, *Fragaria viridis* – sol-sp, *Veronica incana* – sp, *Leucanthemum vulgare* – sp	11,5 ± 0,9	10,0 ± 0,7
	Безостокострецово-разнотравные, луговомятликово-разнотравные, луговоовсяницево-разнотравные	Неглубокие западины на водоразделах	Атмосферное, грунтовое, натечное, нормальное или временно-избыточное	Луговые, дерново-луговые, луговые выщелоченные	*Poa pratensis* – sp-cop$_1$, *Bromopsis inermis* – sp-cop$_2$, *Schoenodorus pratensis* –sp-cop$_1$, *Elytrigia repens* – sp, *Trifolium pratense* L. – sp, *Vicia amoena* – sp	12,6 ± 1,4	7,41 ± 0,8
С-4б – злаково-разнотравные и злаково-осоковые влажные и сырые низинные луга	Безостокострецово-разнотравные, луговомятликово-разнотравные, луговоовсяницево-разнотравные				*Poa pratensis* – sp-cop$_1$, *Bromopsis inermis* – sp-cop$_2$, *Schoenodorus pratensis* – sp-cop, *Elytrigia repens* – sp, *Trifolium pratense* – sp, *Vicia amoena* – sp	12,6 ± 1,4	7,41 ± 0,8
	Гигантскополевицево-безжилковоосоковые, гигантскополевицево-дернистоосоковые, луговолисохвостно-осоковые	Западины на водоразделах	Атмосферное, грунтовое, натечное, избыточное	Лугово-болотные, дерново-луговые, дерново-болотные	*Alopecurus pratensis* – sp-cop$_1$, *Agrostis gigantea* – cop$_1$-cop$_2$, *Carex enervis* – cop$_1$-cop$_2$, *Carex cespitosa* – cop$_1$-cop$_2$, *Equisetum pratense* – sp-cop$_1$	11,0 ± 1,2	6,7 ± 0,6
С-4в – злаковые и разнотравно-злаковые влажные и сырые луга на засоленных почвах	Разнотравно-луговоовсяницевые, разнотравно-гигантскополевицевые, разнотравно-безжилковоосоковые	По водоразделам и их понижениям		Луговые, луговые солонцы	*Agrostis gigantea* – sp-cop$_2$, *Schoenodorus pratensis* – sp-cop$_1$, *Calamagrostis langsdorffii* – sp, *Alopecurus pratensis* – sp, *Critesion brevisubulatum* – sol-sp, *Carex enervis* – sp-cop$_1$, *Potentilla anserina* – sp, *Amoria repens* – sp, *Atriplex sibirica* – sol-sp, *Plantago media* – sp, *Juncus bufonius* – sol-sp	7,4 ± 0,7	6,4 ± 0,6

Таблица 1. Продолжение
Table 1. Continued

Подкласс	Наименование типов и модификаций	Рельеф	Увлажнение	Почва	Обилие основных видов	Продуктивность, ц/га (возд.-сух.), M ± m	
						сена	сух. поедаемой массы
Класс С-5 – краткопоемные луга прирусловой и центральной поймы							
С-5б – злаково-разнотравные влажные и сырые луга	Безостокостецово-луговомятликово-разнотравные, злаково-разнотравные с кострецом безостым, злаково-разнотравно-луговоовсяницевые, злаково-разнотравногигнсткополевицевые	Поймы равнинные, поймы пониженные	Атмосферное, грунтовое, достаточное, реже избыточное	Пойменнные луговые, дерново-луговые влажно-луговые, реже слабосолончаковатые	*Bromopsis inermis* – sp-cop$_1$, *Poa pratensis* – sp-cop$_1$, *Schoenodorus pratensis* – sp-cop$_1$, *Agrostis gigantea* – sp-cop$_2$, *A. trinii* – sp, *Puccinellia tenuissima* – sol-sp, *Agropyron cristatum* – sol-sp, *Critesion brevisubulatum* – sol-sp, *Alopecurus pratensis* – sp, *Festuca rubra* – sol, *Elytrigia repens* – sp, *Deschampsia cespitosa* – sp, *Carex enervis* – sp, *C. rostrata* – sol-sp, *C. cespitosa* – sol-sp, *Amoria repens* –sp, *Thermopsis lanceolata* – sol-sp, *Geranium pratense* – sp, *Stellaria graminea* – sp, *Potentilla anserina* – sp, *Ranunculus propinquus* – sp, *Artemisia mongolica* – sol-sp, *Equisetum arvense* – sp	9,7 ± 0,7	5,8 ± 0,9
	Злаково-разнотравно-гигантскополевицевые, злаково-разнотравно-безжилковоосоковые, злаково- разнотравно-дернистоосоковые				*Agrostis gigantea* – cop$_1$-cop$_2$, *Puccinellia tenuissima* – sp, *Alopecurus pratensis* – sp, *Deschampsia cespitosa* – sp, *Carex enervis* – cop$_1$, *C. cespitosa* – cop$_1$-cop$_2$, *Equisetum pretense* – sp-cop$_1$	7,1 ± 0,8	5,9 ± 0,6
С-7 – болотные луга							
С-7а – осоково-разнотравно-злаковые на минеральных почвах	Осоково-разнотравно-гигантскополевицевые, дернистоосоковые разнотравные закустаренные	Заболоченные поймы, пониженные участки водоразделов	Грунтовое, натечное, избыточное	Лугово-болотные	*Agrostis gigantea* – cop$_2$-cop$_3$, *Calamagrostis langsdorffii* – sol-sp, *C. neglecta* – sp, *Carex enervis* – sp-cop$_1$, *C. cespitosa* – cop$_2$-cop$_3$, *C. acuta* – sol-sp, *C. vesicate* – sol-sp, *C. schmidtii* – sol-sp, *Lathyrus pratensis* – sp, *Menyanthes trifoliata* – sp, *Cicuta virosa* – sol-sp, *Caltha palustris* – sp, *Comarum palustre* – sp, *Spiraea salicifolia* – sp, *Equisetum fluviatile* – sp, *E. palustre* – sp	7,3 ± 0,4	6,1 ± 0,6

Таблица 1. Окончание
Table 1. The end

Подкласс	Наименование типов и модификаций	Рельеф	Увлажнение	Почва	Обилие основных видов	Продуктивность, ц/га (возд.-сух.), M ± m	
						сена	сух. поедаемой массы
С-7 – болотные луга							
С-7б – осоково-разнотравно-злаковые на торфяных почвах	Осоково-разнотравно-злаковые с полевицей гигантской и осокой дернистой	Заболоченные поймы, пониженные участки водоразделов	Грунтовое, натечное, избыточное	Болотные торфяные	*Agrostis gigantea* – cop_2-cop_3, *Glyceria trifloral* – sp, *C. cespitosa* – cop_2-cop_3, *Carex enervis* – sp-cop_1, *C. rostrata* – sol-sp, *C. schmidtii* – sp, *C. vesicate* – sol-sp	8,0 ± 0,8	6,8 ± 0,6

Примечание: С – лесостепная и степная зона. Класс кормовых угодий – высшая таксономическая единица классификации, которая объединяет в пределах природной зоны или горного пояса сенокосы и пастбища по общности зональных климатических, геоморфологических, почвенных условий, растительного покрова (выделяют классы равнинных, низинных, краткопоемных, долгопоемных, болотных природных кормовых угодий и др.), обозначают порядковыми номерами (1, 2, 3 и т. д.): например, при обозначении класса низинных лугов лесостепной и степной зон используют С-4. Подкласс кормовых угодий – крупная таксономическая единица классификации, объединяющая природные кормовые угодья, сходные по положению в рельефе, степени увлажнения, типу почв, их механическому составу, засоленности; для индексации подклассов применяют строчные буквы русского алфавита (а, б, в и т. д.): например, индекс С-4а обозначает подкласс злаково-разнотравные остепненные луга. Группы типов кормовых угодий – средняя таксономическая единица классификации, представляет собой совокупность типов кормовых угодий со сходными условиями увлажнения, механического состава или степени засоления почв и экологически близкими растительными сообществами, характеризуется более узким, чем в подклассе, колебанием экологических условий и особенностей растительности; группы обозначают римскими цифрами: например, С-4а-I – злаково-разнотравные остепненные луга на луговых, лугово-черноземных и др. почвах степной и лесостепной зон. Тип кормовых угодий – сравнительно мелкая таксономическая единица классификации, характеризуется однородностью экологических условий, одинаковыми условиями почвообразования, увлажнения, водно-солевого режима и сходными растительными сообществами по доминантам (субдоминантам) и растениям-эдификаторам, одинаково реагирующим на особенности использования; обозначают арабскими цифрами: например, С-4а-I-3 – мятликово-разнотравные, тимофеевково-разнотравные, житняково-разнотравные луга на дерново-луговых, лугово-черноземных и др. почвах степной и лесостепной зон. Модификации типа кормовых угодий – участки кормовых угодий, растительный покров которых изменился в результате хозяйственного использования; способ индексации модификаций не регламентируется (Istomin, 1984). Обилие по шкале Друде: soc (socialis) – растения образуют сомкнутый полог; cop_3 (copiosae) – растения очень обильны; cop_2 (copiosae) – растения обильны; cop_1 (copiosae) – растения довольно обильны; sp (sparsae) – растения редки; sol (solitaries) – растения единичны. M – среднее значение; m – ошибка среднего

Note: C refers to the forest-steppe and steppe zone. A class of forage lands is the highest taxonomic classification unit integrating hayfields and pastures within a natural zone or a mountain belt according to the similarity of zonal climatic, geomorphological and soil conditions, and vegetation cover (classes of plain, lowland, short-flooded, long-flooded, marshy natural rangelands, etc.), tagged with ordinal numbers (1, 2, 3, etc.); for example, C-4 is used to designate the class of lowland meadows in forest-steppe and steppe zones. A subclass of forage lands is a large taxonomic classification unit merging natural rangelands similar in their location within the relief, moisture degree, soil type, soil texture, and salinity, indexed with lowercase Russian letters (а, б, в, etc.); for example, C-4a designates the subclass of grass-forb steppe meadows). Groups of forage land types are intermediate taxonomic classification units combining rangeland types with similar moisture conditions, soil texture, and salinity degrees, and ecologically similar plant communities, characterized by a narrower fluctuation of environmental conditions and vegetation features than in the subclass; these are denoted by Roman numerals: for example, C-4a-I means grass-forb steppe meadows on meadow, meadow-black-earth, and other soils of steppe and forest-steppe zones. A type of forage lands is a relatively small taxonomic classification unit characterized by uniform environmental conditions, identical soil formation processes, moisture and water-salt regimes, and similar plant communities according to dominants (subdominants) and edifier plants that respond equally to usage patterns; they are denoted by Arabic numerals: for example, C-4a-I-3 refers to bluegrass-forb, timothy-forb or wheatgrass-forb meadows on sod-meadow, meadow-black-earth, and other soils of steppe and forest-steppe zones; forage land type modifications are rangeland areas whose vegetation cover has changed because of their economic utilization; their indexing is not regulated (Istomin, 1984). Abundance on the Drude scale: soc (*socialis*) – plants form a closed canopy; cop_3 (*copiosae*) – plants are very abundant; cop_2 (*copiosae*) – plants are abundant; cop_1 (*copiosae*) – plants are fairly abundant; sp (*sparsae*) – plants are sparse; sol (*solitaries*) – plants are solitary. M is the mean value; m is the error of the mean

точное, на гривах – недостаточное, заливание полыми водами (менее двух недель). Почвы – луговые черноземы и дерново-луговые. Микрорельеф мелкобугристо-западинный, реже западинный, местами по территории встречается гусинолапчатковый сбой. Проективное покрытие травостоем – 70–80%. В составе травостоя произрастают мятлик луговой (*Poa pratensis*), м. узколистный (*P. angustifolia*), полевица гигантская (*Agrostis gigantea*), пырей ползучий (*Elytrigia repens*) и др., во многих местах много лютика (*Ranunculus propinquus*). Продуктивность сена составляет 5,1–21 ц/га, сухой поедаемой массы – 4,2–19,0 ц/га (возд.-сух.). Краткопоемные луга, расположенные на повышенных, хорошо дренированных участках, даже без коренного улучшения могут быть хорошими сенокосами и пастбищами. В коренном улучшении нуждаются луга по средне- и сильносбитым местам, залесенные или закустаренные, а также расположенные на засоленных почвах.

Среднепоемные луга занимают часть прирусловой и центральную часть приматериковой зоны, в поймах р. Куды, р. Малый Кот эти луга закустарены. Почвы дерново-луговые и луговые. Увлажнение атмосферно-грунтовое, достаточное, натечное, иногда временно-избыточное. Микрорельеф мелкобугристозападинный. В травостое (проективное покрытие – 80%) встречаются бескильница тонкоцветковая (*Puccinellia tenuissima* Litv. ex V.I. Krecz.), мятлик луговой (*Poa pratensis*), овсяница луговая (*Schoenodorus pratensis*), полевица гигантская (*Agrostis gigantea*), пырей ползучий (*Elytrigia repens*), кострец (*Bromopsis inermis*), луговое разнотравье, по сбоям – лапчатка гусиная (*Potentilla anserina*). Из вредных и ядовитых в травостое присутствуют хвощ (*Equisetum pratense*), лютик (*Ranunculus propinquus*), корневищные осоки, местами – звездчатка злачная (*Stellaria graminea* L.), реже – термопсис ланцетный (*Thermopsis lanceolata* R. Br. subsp. *sibirica* (Czefr.) Kurbatski). Продуктивность сена – 6,2–16,0 ц/га, сухой поедаемой массы – 10,5 ц/га. Среднепоемные луга относятся к хорошим пастбищам и сенокосам, но часть их (поймы рек Оёк, Малый Кот) сильно закустарены. Местами (п. Оёк, п. Бутырки, вдоль рек Малый Кот, Куда) – участки сеянных кострецовых и овсяницевых лугов с примесью других злаков и разнотравья.

3. **Класс С-7** – болотные луга. Площадь – 1567,5 га:

– подкласс С-7а – осоково-разнотравно-злаковые болота на минеральных почвах представлены заболоченными осоково-разнотравно-гигантскополевицевыми, дернистоосоковыми разнотравными закустаренными растительными сообществами (занимают площадь 733,9 га). Увлажнение грунтовое, натечное, избыточное. Натечная и грунтовая вода часто находится даже на поверхности почвы. Почвы лугово-болотные, дерново-болотные, в различной степени закочкаренные. Проективное покрытие травостоем – 75%. В травостое – полевица гигантская (*Agrostis gigantea*), вейники (*Calamagrostis langsdorffii*, *C. neglecta* (Ehrh.) Gaertn., C.A. Mey. et Scherb.), влаголюбивые осока дернистая (*Carex cespitosa*), о. безжилковая (*C. enervis*), о. острая (*C. acuta* L.), осока пузыреватая (*C. vesicata* Meinsh.), осока Шмидта (*C. schmidtii* Meinsh.), местами луга сильно засорены хвощем болотным (*Equisetum palustre* L.) и х. речным (*E. fluviatile* L.). В пойме р. Малый Кот часть таких лугов закустарены или залесены. Продуктивность сена – 5,5–9,6 ц/га, сухой поедаемой массы – 4,6–8,4 ц/га (возд.-сух.). Такие пастбища и сенокосы из-за переувлажнения малопригодны или непригодны для использования, они нуждаются в коренном улучшении и систематической сушке; при этом необходимо учитывать, что даже после коренного улучшения может происходить вторичное заболачивание территории, зарастание хвощем и осоками.

– подкласс С-7б – осоково-разнотравно-злаковые болота на торфяных почвах (занимают площадь 833,6 га). Основная масса болотных лугов находится в поймах р. Куды и р. Малый Кот, несколько меньше их в пойме р. Большой Кот, руч. Мара. Малопроходимые и непроходимые болота расположены в пойме р. Куды. Увлажнение грунтовое, натечное, избыточное. Почвы болотно-торфяные, лугово-болотные, перегнойно-торфяные, кислотность составляет 6–7,5. Из влаголюбивых осок в травостое с проективным покрытием 70–75% доминируют осока безжилковая (*Carex enervis*), о. дернистая (*C. cespitosa*), о. острая (*C. acuta*), о. пузыреватая (*C. vesicata*), о. Шмидта (*C. schmidtii*) с примесью злаковых растений – полевица гигантская (*Agrostis gigantea*), вейник Лангсдорфа (*Calamagrostis langsdorffii*), в. незамечаемый (*C. neglecta*), критезион короткоостистый (*Critesion brevisubulatum*), овсяница луговая (*Schoenodorus pratensis*), манник трехцветковый (*Glyceria triflora* (Korsh.) Kom.), тростник южный (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.); бобовых – чина луговая (*Lathyrus pratensis* L.); разнотравья – хвощ речной (*Equisetum fluviatile*), х. болотный (*E. palustre*), калужница болотная (*Caltha palustris* L.), вех ядовитый (*Cicuta virosa* L.), вахта трехлистная (*Menyanthes trifoliate* L.), сабельник болотный (*Comarum palustre* L.) и др. Продуктивность сена – 6,8–9 ц/га, сухой поедаемой массы – 5,9–8,8 (возд.-сух.).

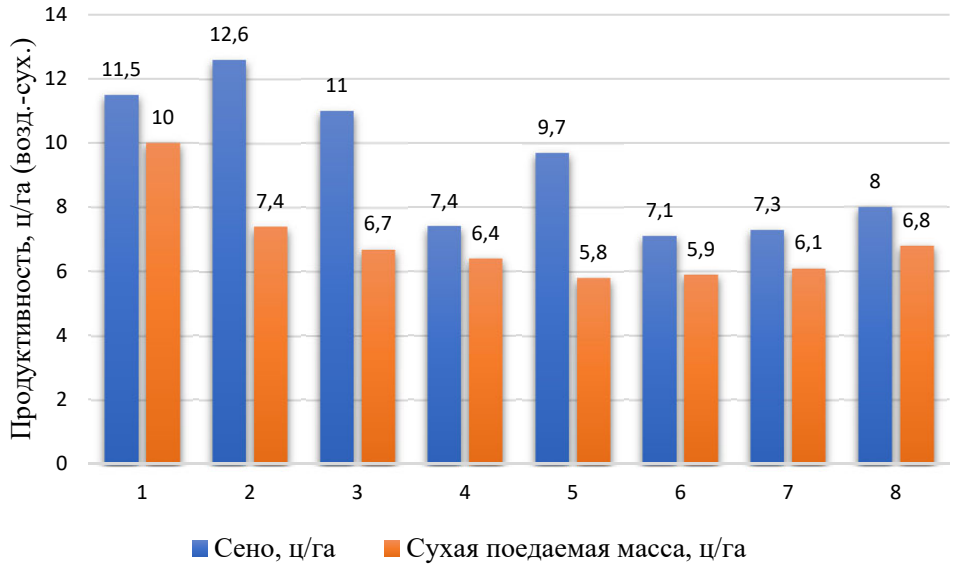
Из выделенных типологических классов кормовых угодий два класса относятся к луговым фитоценозам – низинные, западинные луговые понижения (С-4) и краткопоемные луга прирусловой и центральной поймы (С-5). Значительную площадь на исследованной территории занимают болотные экосистемы (С-7), из которых большая часть относится к проходимым болотам и используется в качестве пастбищ. Устройство магистральных каналов необходимо для осушения и регулировки увлажнения на Кудинских болотах. Осушение плужными канавокопателями возможно на проходимых болотах после расчистки залесенных и закустаренных мест (по р. Большой Кот, р. Малый Кот, руч. Мара).

Продуктивность сена изученных луговых фитоценозов составляет 7,1–12,6 ц/га (возд.-сух.) и 5,8–10,0 ц/га сухой поедаемой массы (возд.-сух.) (рисунок).

Максимальной продуктивностью сена (12,6 ± 1,4 ц/га) и сухой поедаемой массы отличаются низинные злаково-разнотравные луга (10,0 ± 0,7 ц/га). Продуктивность остальных луговых формаций находится в пределах 7,1–11,5 ц/га сена и 5,8–7,4 ц/га сухой поедаемой массы (возд.-сух.).

Площадь кормовых угодий луговых экосистем составляет 14,54% (4235,9 га) от общей площади территории УНПУ «Оёкское» (29 139 га). Экспликация кормовых угодий луговых экосистем представлена в таблице 2.

Из 4235,90 га луговых экосистем чистые кормовые угодья занимают 25,01% (1060,70 га – 262,40 га сенокосов и 798,30 га пастбищ). Площадь закустаренных (941,20 га, или 22,20%) и залесенных (353,8 га, или 8,3%) луговых экосистем составляет 1295 га (30,5%), закочкаренных – 2207,5 га (52,06%), сильносбитых – 186,2 га (4,39%), в различной степени засоренных вредными и ядовитыми травами (хвощи, лютик близкий и др.) – 571,1 га (13,47%), замусоренных, как правило, находящихся вблизи населенных пунктов – 25,6 га (0,60%), участков со слабокаменистыми почвами – 175,1 га



1. С-4а / I-3 – злаково-разнотравные остепненные луга с мятликом узколистным, тимофеевкой степной, житняком гребенчатым, осокой твердоватой, злаково-разнотравные по редколесью
2. С-4б / I-3 – злаково-разнотравные низинные луга с кострецом безостым, мятликом луговым, овсяницей луговой
3. С-4б / II-4 – злаково-осоковые влажные и сырые низинные луга с полевицей гигантской, осокой дернистой и осокой безжилковой
4. С-4в / I-3 – разнотравно-злаковые влажные и сырые луга на засоленных почвах с овсяницей луговой, полевицей гигантской, осокой безжилковой
5. С-5б / I-4 – краткопоемные злаково-разнотравные влажные луга с кострецом безостым, овсяницей луговой, полевицей гигантской
6. С-5б / II-2 – краткопоемные злаково-разнотравные сырые луга с полевицей гигантской, осокой безжилковой, осокой дернистой
7. С-7а / I-4 – болотные осоково-разнотравно-злаковые луга на минеральных почвах с полевицей гигантской, осокой дернистой, местами закустаренные
8. С-7б / I-3 – болотные осоково-разнотравно-злаковые луга с полевицей гигантской и осокой дернистой на торфяных почвах

Рисунок. Продуктивность сена и сухой поедаемой массы
Figure. Productivity of hay and consumable dry matter

Таблица 2. Экспликация обследованных кормовых угодий луговых экосистем
Table 2. Explication of the surveyed forage lands of meadow ecosystems

Культуртехническое состояние	Низинные, западинные луговые понижения		Краткопоемные луга прируслovой и центральной поймы		Болотные луга		Всего
	сенокосов	пастбищ	сенокосов	пастбищ	сенокосов	пастбищ	
Сенокосов – 602,1 га, пастбищ – 3633,8 га, из них:							
Чистых, га	170,90	236,60	42,60	349,40	48,90	212,30	1060,70
Чистых, %	4,03	5,58	1,00	8,24	1,15	5,01	25,01
Слабозакустаренных, га	–	9,10	–	53,10	7,20	208,90	278,30
Слабозакустаренных,%	–	0,21	–	1,25	0,17	4,93	6,56
Сильнозакустаренных, га	85,20	166,10	11,00	246,70	12,30	141,60	662,90

Таблица 2. **Окончание**
Table 2. **The end**

Культуртехническое состояние	Низинные, западинные луговые понижения		Краткопоемные луга прирусловой и центральной поймы		Болотные луга		Всего
	сенокосов	пастбищ	сенокосов	пастбищ	сенокосов	пастбищ	
Сильнозакустаренных,%	2,00	3,92	0,26	5,82	0,29	3,34	15,63
Слабозалесенных, га	81,50	75,40	–	–	–	4,30	161,20
Слабозалесенных,%	1,92	1,78	–	–	–	0,10	3,80
Сильнозалесенных, га	41,30	49,30	5,40	–	–	96,60	192,60
Сильнозалесенных, %	0,97	1,16	0,13	–	–	2,28	4,54
Слабозакочкаренных, га	20,10	132,60	–	79,30	–	292,20	524,20
Слабозакочкаренных, %	0,47	3,13	–	1,87	–	6,89	12,36
Сильнозакочкаренных, га	90,30	570,10	4,00	380,30	1,30	637,30	1683,30
Сильнозакочкаренных, %	2,13	13,45	0,09	8,97	0,03	15,03	39,70
Сильносбитых, га	–	48,60	–	37,50	16,80	83,30	186,20
Сильносбитых, %	–	1,15	–	0,88	0,40	1,96	4,39
Засоренных ядовитыми травами, га	13,00	96,80	10,00	–	–	71,30	191,10
Засоренных ядовитыми травами, %	0,31	2,28	0,24	–	–	1,68	4,51
Засоренных вредными травами, га	17,60	127,90	–	–	7,20	227,30	380,00
Засоренных вредными травами, %	0,42	3,01	–	–	0,17	5,36	8,96
Замусоренных троп, га	–	15,70	–	–	–	9,90	25,60
Замусоренных троп, %	–	0,37	–	–	–	0,23	0,60
Слабокаменистых, га	–	31,1	–	–	–	144,0	175,1
Слабокаменистых, %	–	0,73	–	–	–	3,40	4,13

(4,13%). Следует учитывать, что многие фитоценозы могут быть не только закустаренными или залесенными, но и закочкаренными и заболоченными, как, например, злаково-дернистоосочники, а также сильнозакустаренными, сильнозакочкаренными, засоренными ядовитыми и вредными травами и заболоченными одновременно, как, например, злаково-безжилкосоковые растительные сообщества.

Заключение

В результате изучения эколого-фитоценотических особенностей кормовых угодий УНПУ «Оёкское» выделены 2 класса луговых экосистем (С-4 – низинные, западинные луговые понижения, С-5 – краткопоемные луга прирусловой и центральной поймы) и класс болотных экосистем (С-7). Луговые экосистемы и болотные луга объединяют 6 подклассов, 8 типов и модификаций.

Общая площадь исследованных луговых экосистем составляет 4235,9 га (14,54% от общей территории исследования), из которых 14,2% занимают сенокосы (602,1 га) и 85,8% пастбища (3633,8 га). Максимальная площадь приходится на низинные, западинные луговые понижения – 1583,7 га (37,4%) и болотные луга – 1567,5 га (37,0%), площадь краткопоемных лугов, распространенных по поймам р. Куды, р. Большой Кот, р. Малый Кот, р. Оёк, руч. Мара, составляет 1084,7 га (25,6%).

В хозяйстве нет хороших сенокосов и пастбищ. Кормовые угодья вблизи населенных пунктов (д. Максимовщина, д. Оёк и др.) находятся в неудовлетворительном состоянии; как правило, они средне- или сильносбитые, в составе травостоя местами доминирует лапчатка гусиная (*Potentilla anserina*) с примесью амории ползучей (*Amoria repens*), подорожника (*Plantago*) и разнотравья. В результате повышенной нагрузки на пастбища луговые фитоценозы местами сильно закочкарены (д. Тур-

ская, д. Оёк и др.). Заболоченные луга наиболее распространены в пойме р. Малый Кот и р. Большой Кот, часть этих лугов залесены и закустарены, отличаются натечным и избыточным увлажнением, бугристо-западинным микрорельефом, доминированием болотных осок – о. безжилковая (*Carex enervis*), о. дернистая (*C. cespitosa*), о. Шмидта (*C. schmidtii*) и др., засоренностью хвощами – х. болотный (*Equisetum palustre*), х. речной (*E. fluviatile*). Болотные луга являются малоценными в кормовом отношении и малопригодными для использования. Из 4235,9 га луговых экосистем чистые кормовые угодья занимают 25,01%, остальная площадь приходится на закустаренные, залесенные, закочкаренные, сильносбитые, местами засоренные вредными и ядовитыми травами фитоценозы.

Продуктивность кормовых угодий составляет 7,10–12,6 ц/га и 5,80–10,0 ц/га сухой поедаемой массы (возд.-сух.).

Поверхностное улучшение рекомендовано для сходольных и краткопоемных лугов. Сильнозакустаренные среднепоемные, низинные и болотные луга нуждаются в коренном улучшении. Всего подлежат коренному улучшению 72,16% (3056,6 га) кормовых угодий луговых экосистем, поверхностному – 24,55% (1040,1 га), для рационального использования рекомендованы 3,29% (139,2 га).

По результатам проведенных исследований составлена карта геоботанического обследования природных кормовых угодий луговых экосистем и карта культуртехнического состояния и мероприятий по использованию природных кормовых угодий луговых экосистем УНПУ «Оёкское» (в масштабе 1 : 25 000). Мероприятия по улучшению и эффективному использованию луговых фитоценозов рекомендованы для внедрения в производство УНПУ «Оёкское» с целью эффективного использования и повышения продуктивности природных сенокосов и пастбищ.

References / Литература

Babaeva M.A., Osipova S.V. Features of fodder pasture plants in Tersko-Kuskaya Lowland under anthropogenic pressure. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2021;(1):52-56. [in Russian] (Бабаева М.А., Осипова С.В. Особенности пастбищных кормовых растений Терско-Кумской низменности при антропогенном прессинге. *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2021;(1):52-56). DOI: 10.30850/vrsn/2021/1/52-56

Blagoveshchensky G.V., Kononchuk V.V., Sobolev S.V. Modern forage production in European agriculture. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2019;(3):33-47. [in Russian] (Благовещенский Г.В., Кончук В.В., Соболев С.В. Современное кормопроизводство в европейском сельском хозяйстве. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2019;(3):33-47). DOI: 10.34677/0021-342X-2019-3-33-47

Chepinoga V.V., Stepantsova N.V., Grebenyuk A.V., Verkhozina A.V., Vinkovskaya O.P., Gnutikov A.A., Dulepova N.A., Enushchenko I.V., Zarubin A.M., Kazanovsky S.G., Konovalov A.S., Korobkov A.A., Luferov A.N., Rosbach S.A. Conspectus florae provinciae Irkutskiensis (plantae vasculares). Irkutsk: Irkutsk State University; 2008. [in Russian] (Чепинога В.В., Степанцова Н.В., Гребенюк А.В. Верхозина А.В., Виньковская О.П., Гнутиков А.А., Дулепова Н.А., Енущенко И.В., Зарубин А.М., Казановский С.Г., Коновалов А.С., Коробков А.А., Луферов А.Н., Росбах С.А. Конспект флоры Иркутской области (сосудистые растения). Иркутск: Иркутский государственный университет; 2008).

Istomin A.A. (ed.). All-Union instructions for conducting a geobotanical survey of natural forage lands and compiling large-scale geobotanical maps (Obshchesoyuznaya instruktsiya po provedeniyu geobotanicheskogo obsledovaniya prirodnykh kormovykh ugodiy i sostavleniyu krupnomasshtabnykh geobotanicheskikh kart). Moscow: Kolos; 1984. [in Russian] (Общесоюзная инструкция по проведению геоботанического обследования природных кормовых угодий и составлению крупномасштабных геоботанических карт / под ред. А.А. Истомина. Москва: Колос; 1984).

Khudonogova E., Tretyakova S., Mikhlyaeva A., Tungrikova V., Rachenko M. Ecological features of useful plants in natural populations of the Western Baikal Region. In: *SGEM 2019: Proceedings of the 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (Bulgaria, 30 June – 6 July 2019). Vol. 19, Issue 5.2*. Sofia: STEF92 Technology; 2019. p.301-306. DOI: 10.5593/sgem2019/5.2/S20.037

Korniyevskaya T.V., Silantyeva M.M. Recultivation of degraded pasturable lands in dry steppe environments. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2017;178(3):5-12. [in Russian] (Корниевская Т.В., Силантьева М.М. Рекультивация деградированных пастбищных угодий в условиях сухой степи. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2017;178(3):5-12). DOI: 10.30901/2227-8834-2017-3-5-12

Kutuzova A.A., Zotov A.A., Trofimova L.S., Privalova K.N., Zhezmer N.V., Rodionova A.V., Provornaya E.E., Akhlamova N.M., Shcherbakov M.F., Teberdiev D.M., Kulakov V.A., Korotkov B.I., Dikarev V.G., Savchenko I.V., Frantseva A.A., Orlenkova E.K., Blagoveshchensky G.V., Konstantinov M.D., Kolomeichenko V.V., Bogomolov V.A., Barashkova N.V., Maliev V.Kh., Sabitov G.A. Guidelines for conducting scientific research in hayfields and pastures (Metodicheskiye ukazaniya po provedeniyu nauchnykh issledovaniy na senokosakh i pastbishchakh). Moscow: Williams All-Russian Research Institute of Forages; 1996. [in Russian] (Кутузова А.А., Зотов А.А., Трофимова Л.С., Привалова К.Н., Жезмер Н.В., Родионова А.В., Проворная Е.Е., Ахламова Н.М., Щербаков М.Ф., Тебердиев Д.М., Кулаков В.А., Коротков Б.И., Дикарев В.Г., Савченко И.В., Францева А.А., Орленкова Е.К., Благовещенский Г.В., Константинов М.Д., Коломейченко В.В., Богомолов В.А., Барашкова Н.В., Малиев В.Х., Сабитов Г.А. Методические указания по проведению научных исследований на сенокосах и пастбищах. Москва: ВНИИ кормов им. В.Р. Вильямса; 1996).

Mikhlyaeva A.A., Khudonogova E.G. Phytotopological classification of fodder lands of north-western part of Irkutsk region. *Vestnik IrGSHA*. 2018;(85):68-74. [in Russian] (Михляева А.А., Худоногова Е.Г. Фитотопологическая классификация кормовых угодий северо-западной части Иркутской области. *Вестник ИрГСХА*. 2018;(85):68-74).

Mirkin B.M. Theoretical foundations of modern phytocenology (Teoreticheskiye osnovy sovremennoy fitotsenologii). Moscow: Nauka; 1985. [in Russian] (Миркин Б.М. Теоретические основы современной фитоценологии. Москва: Наука; 1985).

Mirkin B.M., Rosenberg G.S. Phytocenology. Principles and methods. (Fitotsenologiya. Printsipy i metody). Moscow: Nauka; 1978. [in Russian] (Миркин Б.М., Розенберг Г.С. Фитоценология. Принципы и методы. Москва: Наука; 1978).

Syeva S.Ya., Bugaeva M.V., Ledyaeva N.V., Salnikova E.A., Basargina O.M. Biological and morphological characteristics of Fabaceae forage plants and crops under the conditions of Republic of Altai. *Innovations and Food Safety*. 2021;4(34):112-122. [in Russian] (Сыева С.Я., Бугаева М.В., Ледяева Н.В., Сальникова Е.А., Басаргина О.М. Биолого-морфологическая характеристика бобовых кормовых растений и культур в условиях республики Алтай. *Инновации и продовольственная безопасность*. 2021;4(34):112-122). DOI: 10.31677/2072-6724-2021-34-4-112-122

Tishchenko M.P., Korolyuk A.Yu. Syntaxonomic diversity of meadow vegetation of right-bank part of the upper Ob basin (Novosibirsk Oblast). *Flora and Vegetation of Asian Russia*. 2020;4(40):3-35. [in Russian] (Тищенко М.П. Королюк А.Ю. Синтаксономическое разнообразие луговой растительности правобережной части верхнего Приобья (Новосибирская область). *Растительный мир Азиатской России*. 2020;4(40):3-35). DOI: 10.21782/RMAR1995-2449-2020-4(3-35)

Zapivalov S.A. Effect of multi-variant management systems of long-term hayfields on botanical composition and quality of feed. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2021;(5):131-146. [in Russian] (Запивалов С.А. Влияние многовариантных систем ведения долголетних сенокосов на ботанический состав и качество корма. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2021;(5):131-146). DOI: 10.26897/0021-342X-2021-5-131-147

Информация об авторах

Елена Геннадьевна Худоногова, доктор биологических наук, заведующая кафедрой, Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского, 664038 Россия, Иркутская область, Иркутский район, п. Молодежный, doky2015@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-0510-7582

Светлана Викторовна Половинкина, кандидат биологических наук, доцент, Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского, 664038 Россия, Иркутская область, Иркутский район, п. Молодежный, polovinka@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-6063-2411

Information about the authors

Elena G. Khudonogova, Dr. Sci. (Biology), Head of a Department, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, Molodezhny Settlem., Irkutsk District, Irkutsk Province 664038, Russia, doky2015@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-0510-7582

Svetlana V. Polovinkina, Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, Molodezhny Settlem., Irkutsk District, Irkutsk Province 664038, Russia, polovinka@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-6063-2411

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 17.11.2025; одобрена после рецензирования 30.03.2026; принята к публикации 22.04.2026.
The article was submitted on 17.11.2025; approved after reviewing on 30.03.2026; accepted for publication on 22.04.2026.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 634.717:631.527
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o22

CC BY

Селекционные модели сортов ежевики для средней полосы России в связи с различной зимостойкостью и габитусом растений

Л. А. Грюнер

Всероссийский научно-исследовательский институт селекции плодовых культур, Орловская область, Россия

Автор, ответственный за переписку: Лидия Андреевна Грюнер, gruner@orel.vniispk.ru

Актуальность. Ежевика в последние годы становится все более востребованной ягодной культурой на территории России. Однако потенциал зимостойкости этой культуры невысок, поэтому расширение зоны возделывания в регионы страны с холодными зимами сопряжено с необходимостью подзимнего укрытия растений или создания более выносливых к низким зимним температурам сортов селекционным путем. Цель исследования – обосновать необходимость разработки нескольких моделей сортов ежевики для средней полосы России в связи с разными морозо- и зимостойкостью и типами роста.
Материалы и методы. Проведена оценка морозостойкости 39 образцов разных морфологических типов из биоресурсной коллекции ежевики в Орловской области в 2022–2025 гг. (с абсолютными минимумами –25°С, –29,5°С и –19°С соответственно) в полевых условиях с использованием общепринятой в России методики. Большая часть сортов находилась зимой под укрытием агроволокном. Для статистической обработки данных использован вариационный анализ.
Результаты. Выявлены различия по морозостойкости между четырьмя морфологическими типами сортов и отдельными генотипами в пределах групп. Определено, что для решения проблемы зимостойкости селекционным путем перспективны в селекции в этой климатической зоне представители трех групп – пряморослых летних, ремонтантных и стелющихся летних.
Заключение. Анализ полученных данных позволяет рассматривать в качестве селекционных ориентиров три основные модели сортов ежевики, нацеленных на повышение зимостойкости культуры в условиях средней полосы России. Первая модель – высокозимостойкие сорта с пряморослым компактным габитусом, предназначенные для неукрывной культуры; вторая модель – ремонтантные сорта с раннеосенним созреванием ягод и морозостойкой подземной частью для выращивания без зимнего укрытия; третья модель – раннеспелые сорта со стелющимися гибкими побегами для укрывной культуры.

Ключевые слова: селекция ежевики, приоритетные направления, морфологические группы

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания, согласно тематическому плану ВНИИСПК по теме № FGZS-2025-0009: «Создание конкурентоспособных сортов ягодных культур с использованием современных методов селекции и разработка элементов технологии их возделывания».

Для цитирования: Грюнер Л.А. Селекционные модели сортов ежевики для средней полосы России в связи с различной морозостойкостью и габитусом растений. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(2):47-57. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o22

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.

© Грюнер Л.А., 2026

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o22

Breeding models of blackberry cultivars for central Russia in connection with different winter hardiness and plant habits

Lidia A. Gruner

Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding, Orel Province, Russia

Corresponding author: Lidia A. Gruner, gruner@orel.vniispk.ru

Background. In recent years, blackberry has become an increasingly popular small-fruit crop in Russia. However, its winter hardiness is relatively low, so expanding its cultivation to regions with cold winters requires winter sheltering or the development of more winter-hardy cultivars through selective breeding. The objective of this study was to justify the need to develop several models of blackberry cultivars for the central regions of Russia due to their different frost and winter hardiness and growth types.
Materials and methods. Thirty-nine accessions of different morphological types from the blackberry bioresource collection were analyzed for their frost resistance in Orel Province in 2022–2025 (with absolute minimums of –25°C, –29.5°C, and –19°C, respectively). Field tests were performed using the methodology conventional for Russia. Most of the cultivars were covered with agrofabric during the winters. Variance analysis was used for statistical data processing.
Results. Differences in frost resistance were found among four morphological types of cultivars and individual genotypes within the groups. Representatives of three groups – upright summer, primocane-fruiting, and trailing summer cultivars – were identified as promising for solving the problem of winter hardiness through selective breeding in this climate zone.
Conclusion. The analysis of the data obtained helped to choose three main models of blackberry cultivars as benchmarks for breeding targeted at increasing the crop's winter hardiness under the conditions of central Russia. The first model incorporates cultivars with high winter hardiness and an erect, compact growth habit, intended for unprotected cultivation; the second model is represented by primocane-fruiting cultivars with early fall ripening of berries and frost-resistant underground parts for cultivation without winter sheltering; the third model contains early-ripening cultivars with trailing flexible shoots for covered cultivation.

Keywords: blackberry breeding, priority trends, morphological groups

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of a state task in accordance with the thematic plan of the Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding, Topic No. FGZS-2025-0009 "Creation of competitive cultivars of berry crops using modern breeding methods and development of the components of their cultivation technology".

For citation: Gruner L.A. Breeding models of blackberry cultivars for central Russia in connection with different winter hardiness and plant habits. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(2):47-57. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o22

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

Селекция многолетних растений, в том числе и ежевики, – длительный процесс, занимающий десятки лет. Поэтому правильные ориентиры селекционеров при планировании новых сортов в сочетании с грамотно подобранным исходным генетическим материалом, базирующемся на новейших мировых достижениях, – ключевые моменты в этом процессе в каждой климатической зоне.

Разработка моделей новых сортов, как правило, опирается на несколько главных позиций: показатели адаптивности культуры к конкретным абиотическим и биотическим факторам среды, обоснованное требованиями рынка представление селекционера о необходимых вкусовых и товарных качествах плодов и оптимальной продуктивности будущих сортов, а также на постоянный мониторинг технологических требований к получаемым сортам.

Ежевика – теплолюбивая культура, так как большинство дикорастущих видов – родоначальников современных сортов и их предшественников происходит из зон с мягким климатом (Ourecky, 1981; Vitkovsky, 2003), в связи с чем предел морозостойкости большинства из них находится в температурном диапазоне от –10°C до –20°C (Wójcik-Seliga, Wójcik-Gront, 2013; Evdokimenko, Kulagina, 2015; Telepenko, 2018; Gruner, 2019; Ladyzhenskaya et al., 2023). Практика показывает, что лишь небольшая часть созданных к настоящему времени сортов выдерживает более низкие температуры, да и то чаще всего при кратковременном их воздействии. В условиях же средней полосы России, в том числе в зоне наших исследований – в Орловской области России, большинство зим включает, кроме значительных минимумов (около –25… –30°C), довольно длительные периоды (в среднем от 10 до 20 дней) с круглосуточными отрицательными температурами на уровне –10°C и ниже, что губительно для растений ежевики (Gruner, Kornilov, 2020). Поэтому промышленное выращивание этой культуры в указанной зоне является рискованным и не гарантирует стабильных урожаев и регулярности плодоношения сортов в условиях открытого грунта. В то же время спрос на ягоды ежевики и саженцы ее сортов становится здесь с каждым годом выше, благодаря созданным в мире сортам последних селекционных поколений с хорошими товарными и вкусовыми качествами и высокой пищевой ценностью ягод, обеспеченной биохимическим составом плодов (Connor et al., 2005; Clark, Finn, 2011; Finn, Clark, 2012, Kolbas et al., 2012; Lee, 2017; Makarkina et al., 2022).

Широкую палитру выдающихся сортов ежевики дали производителям ягод к настоящему времени селекционные программы ряда зарубежных стран (в первую очередь – США, а также Великобритании, Сербии, Польши, Новой Зеландии), обеспечивающих мировой рынок свежими ягодами (Stanisavljevic, 1999; Clark, Moore, 2005, 2008; Clark, 2014; Finn et al., 2014; Finn et al., 2018; Clark et al., 2019) и продуктами их переработки. При этом очевидно, что наиболее качественные ягоды – это ягоды местного производства, собранные в стадии потребительской зрелости, не подвергавшиеся длительной транспортировке и хранению. В связи с этим создание сортов ежевики для местных рынков в регионах с холодными зимами – одна из актуальных задач селекционеров этих климатических зон.

Активные исследования по селекции ежевики в средней полосе России были начаты нами во Всероссийском НИИ селекции плодовых культур в 2013 г. со сбора базовой биоресурсной коллекции. Главная роль этой коллекции – обеспечить селекционный процесс геноплазмой новейших мировых достижений для создания адаптированных к условиям региона сортов ежевики с необходимыми параметрами качества ягод. К настоящему времени данная коллекция насчитывает более 40 сортов. Сортообразцы, привлекаемые в коллекцию, проходят фенотипическую оценку в условиях зоны исследований для отбора наиболее ценных из них в дальнейшей селекции. Разработана селекционная программа на период до 2035 г.

Цель исследования – обосновать необходимость разработки нескольких моделей сортов ежевики для средней полосы России в связи с разными морозо- и зимостойкостью и типами роста.

Материал и методы

Исследования проводили на участке сортоизучения ежевики отдела ягодных культур Всероссийского НИИ селекции плодовых культур (ВНИИСПК) в Орловской области России. Почвы опытного участка серые лесные, хорошо окультуренные, территория со всех сторон окружена ветрозащитными полосами из деревьев и кустарников.

Объектами изучения служили 39 образцов биоресурсной коллекции ВНИИСПК, в том числе 37 сортов, интродуцированных из разных регионов мира через российские частные питомники, и две селекционные формы ежевики (табл. 1). В приведенной таблице образцы сгруппированы по морфологическим типам с учетом характера роста побегов и типа плодоношения.

В составе коллекции представлены 4 группы сортов с разным типом роста побегов и характером плодоношения: прямослые летние, прямослые ремонтантные, плодоносящие на побегах текущего года, стелющиеся и полупрямослые/полустелющиеся с летним плодоношением на побегах второго года. Преобладают среди них тетраплоиды (2n = 4x = 28) с бесшипными побегами (признак контролируется рецессивным геном в гомозиготном состоянии – *ss*). Часть сортов – гексаплоиды (2n = 4x = 42) стелющегося типа с доминантной бесшипностью, контролируемой генами *Sf* и *Sfl*.

Методическим руководством при разработке трех моделей сортов ежевики для средней полосы России служил раздел, посвященный этой культуре в «Программе и методике селекции плодовых, ягодных и орехоплодных культур» (Kichina et al., 1999). Обозначенная там модель «идеального» сорта была составлена как унифицированная для сортов разных климатических зон и морфологических типов. Однако при значительном полиморфизме сортов ежевики по габитусу растений и различиях по уровню зимостойкости подобная модель не может быть однозначным ориентиром для селекционеров в разных регионах, в том числе – центральном. К тому же каждая из морфологических групп сортов играет определенную роль в производстве ягод и может быть более удобной при том или ином способе выращивания, поэтому по-своему нуждается в селекционном совершенствовании с учетом этих особенностей. Выбор ряда других параметров моделей сортов, касающихся качества плодов и других хозяйственных показателей, опирался на детальный обзор требований к новым сортам, сделанный ведущими селекционерами по ежевике США (Clark, Finn, 2011; Finn, Clark, 2012).

Таблица 1. Сортообразцы ежевики биоресурсной коллекции Всероссийского НИИ селекции плодовых культур, включенные в исследование

Table 1. Blackberry accessions from the bioresource collection of the Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding included in the study

Название сорта	Страна-оригинатор	Плоидность (2n)	Шиповатость, ген
1-я группа – пряморослые летние			
'Agawam'	США	28	шиповатый, *S*
'Erie'	США	28	шиповатый, *S*
'Ilini Hardy'	США	28	шиповатый, *S*
'Brzezina'	Польша	28	бесшипный, *ss*
'Caddo'	США	28	бесшипный, *ss*
'Heaven Can Wait'	США	28	бесшипный, *ss*
'Natchez'	США	28	бесшипный, *ss*
'Navaho'	США	28	бесшипный, *ss*
'Osage'	США	28	бесшипный, *ss*
'Ouachita'	США	28	бесшипный, *ss*
'Ponca'	США	28	бесшипный, *ss*
'Von'	США	28	бесшипный, *ss*
2-я группа – пряморослые ремонтантные			
'Black Magic'	США	28	шиповатый, *S*
'Danna'	США	28	бесшипный, *ss*
'Black Gem'	США	28	бесшипный, *ss*
'Prime Jan'	США	28	шиповатый, *S*
'Prime Jim'	США	28	шиповатый, *S*
'Prime Ark-45'	США	28	шиповатый, *S*
'Prime Ark Freedom'	США	28	бесшипный, *ss*
'Prime Ark Traveler'	США	28	бесшипный, *ss*
'Reuben'	США, Англия	28	шиповатый, *S*
3-я группа – стелющиеся			
'Columbia Star'	США	42	бесшипный, *Sfl*
'Columbia Sunrise'	США	42	бесшипный, *Sfl*
'Columbia Giant'	США	42	бесшипный, *Sfl*
'Hall's Beauty'	США	42	бесшипный, *Sfl*
'Karaka Black'	Новая Зеландия	42	шиповатый *S*
'Helen'	Великобритания	42	бесшипный, *Sf*
'Waldo'	США	42	бесшипный, *Sf*

Таблица 1. Окончание
Table 1. The end

Название сорта	Страна-оригинатор	Плоидность (2n)	Шиповатость, ген
4-я группа – полупряморослые/полустелющиеся			
'Black Satin'	США	28	бесшипный, *ss*
'**Č**ačanska Bestrna'	Сербия	28	бесшипный, *ss*
'Chester Thornless'	США	28	бесшипный, *ss*
'Gai'	Польша	28	бесшипный, *ss*
'Kiova'	США	28	бесшипный, *ss*
'Loch Tay'	Шотландия	28	бесшипный, *ss*
'Polar'	Польша	28	бесшипный, *ss*
'Thornfree'	США	28	бесшипный, *ss*
'Triple Crown'	США	28	бесшипный, *ss*
'Victoria'	США	28	бесшипный, *ss*
ЭЛС 1	Россия	28	шиповатый, *S*
ЭЛС 2	Россия	28	шиповатый, *S*

Для оценки сортов биоресурсной коллекции ежевики по морозостойкости (ведущему параметру для сортов этой зоны) использовали методические указания, изложенные в разделе по сортоизучению культуры в «Программе и методике сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур» (Kazakov et al., 1999), общепринятой в России. Сорта с заранее известной высокой морозостойкостью оставляли без зимнего укрытия. Остальные накрывали осенью белым агроволокном повышенной плотности (90 г/м^2) в один слой. Весной, после наступления положительных среднесуточных температур (обычно в начале апреля), укрытие снимали и после распускания почек оценивали степень подмерзания надземной части растений в баллах (по 5-балльной шкале) согласно методике.

Проведенное исследование включало не менее 3–5 растений по каждому образцу, что является достаточным для общей предварительной оценки и использования сортов в скрещиваниях, с учетом необходимости зимнего укрытия растений.

Сведения о минимальных температурах в зимние периоды лет изучения и другие метеопоказатели представлены по данным метеопоста ВНИИСПК.

Расчет показателей вариационного ряда проводили согласно «Методике полевого опыта» (Dospekhov, 1985) с помощью онлайн-калькулятора (https://medstatistic.ru).

Результаты

Учитывая, что главным лимитирующим фактором для выращивания ежевики в условиях средней полосы России (в том числе и Орловской области) является недостаточная зимостойкость большинства созданных сортов, для составления запланированных моделей будущих сортов ежегодно оценивали морозо- и зимостойкость образцов биоресурсной коллекции ежевики в полевых условиях. Исходили из того, что оценка морозостойкости по данным полевого учета дает наиболее объективную и полную характеристику сортов по этому показателю. Важно при этом, чтобы в зимние периоды наступали типичные для региона минимумы температур, позволяющие выявить потенциальные возможности адаптации к ним исследуемых сортов.

В таблице 2 показаны минимальные температуры трех последних зим: 2022/2023, 2023/2024 и 2024/2025 г., которые воздействовали на растения ежевики изучаемой коллекции и позволили оценить их морозостойкость. Ранее (Gruner, 2019) нами было установлено, что температура воздуха под укрытием обычно на 4–5°C выше, чем снаружи. К тому же укрытые растения испытывают меньшее воздействие иссушающих зимних и весенних ветров. В этих условиях наступление критических для ежевики зимних температур показывает морозо- и зимостойкость сортов в более мягких условиях для укрытых растений, по сравнению с неукрытыми, а также потенциальную возможность выращивания первых в этой зоне с применением такого укрытия. Оценка степени подмерзания выявила разницу в морозостойкости между сортами, находящимися под защитой укрывного материала, которая оказалась сортоспецифичной и варьировала в довольно широком диапазоне. А высокая морозо- и зимостойкость сортов, оставленных зимой в открытом грунте, подтвердилась.

Как следует из таблицы, начало января 2023 г. было самым холодным за зиму 2022/2023 г., а абсолютный минимум составил –25°C. Анализ метеоданных показал, что резкое понижение температуры в этом месяце, продолжавшееся пять суток, наступило сразу после трехдневной оттепели с положительными температурами, достигавшими в дневные часы от +3 до +7°C, то есть перепад температур составил более 20°C. Снежный покров в этот период отсутствовал. Затем до конца января значительных понижений температуры не наблюдалось. Еще два пика снижения температур до значений, критических для ежевики, наблюдались в феврале 2023 г., когда существенные морозы происходили с более постепенным

Таблица 2. Минимальные температуры зимних[1] периодов в годы исследований
(Всероссийский НИИ селекции плодовых культур, 2022–2025 гг.)

Table 2. Minimum winter[1] temperatures during the years of studying
(Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding, 2022–2025)

2022/2023 г.				
Месяц	**декабрь**	**январь**	**февраль**	**март**
Минимальная температура, °С (дата)	**–14,5*** (05.12)	**–15,0*** (06.01) **–23,0*** (07.01) **–25,0*** (08.01) **–23,5*** (09.01) **–15,0*** (11.01)	**–19,0*** (08.02) **–18,0*** (22.02) **–18,7*** (23.02) **–17,0*** (24.02)	–9,6 (08.03)
Абсолютный минимум за зиму, °С	**–25,0** (08.01)			
2023/2024 г.				
Минимальная температура, °С (дата)	**–15,0*** (05.12 07.12)	**–29,5*** (03.01) **–28,0*** (04.01); **–26,5*** (05.01) **–24,6*** (06.01) **–19,0*** (07.01) **–29,0*** (08.01) **–29,5*** (09.01) **–17,5*** (10.01) **–18,5* (**12.01) **–29,5*** (13.01 и 14.01) **–19,0*** (15.01) **–20,0*** (21.01) **–22,0*** (22.01 и 23.01)	–**14,0*** (07.02) –**20,0*** (09.02) –**24,2*** (10.02) –**22,8*** (11.02) –**22,5*** (20.02) –**18,0*** (21.02)	**–18,5*** (07.03) **–18,0*** (08.03) **–18,0*** (09.03) **–21,0*** (11.03) **–20,0*** (12.03) **–17,0*** (13.03) **–14,5*** (14.03)
Абсолютный минимум за зиму, °С	**–29,5** (03.01, 09.01, 13.01, 14.01)			
2024/2025 г.				
Минимальная температура, °С (дата)	**–13,1*** (19.12	–5,0 (06.01 и 07.01)	**–12,0*** (14.02) **–11,0*** (17.02) **–11.0*** (20.02) **–11.0*** (21.02) **–11.0*** (22.02) **–15,0*** (23.02) **–18.0*** (24.02) **–18,5*** (25.02) **–18,0*** (26.02) **–19.5*** (27.02) **–18,0*** (28.02)	**–10,0*** (01.03)
Абсолютный минимум за зиму, °С	**–19.5** (27.02)			

Примечание: [1] – учитывая, что в первой половине марта 2024 г. стабильно удерживалась по-зимнему холодная погода, этот месяц в рамках данного исследования условно отнесли к зимнему периоду; * – отрицательные температуры, потенциально опасные для растений ежевики

Note: [1] – considering that the first half of March in 2024 was characterized by consistently cold winter weather, this month was conditionally classified as a winter month in the framework of this study; * – subzero temperatures, potentially dangerous for blackberries

снижением температур, чем в январе, но также при минимальном снежном покрове (до 7 см).

Пятнадцать дней января 2024 г. были очень холодными (абсолютный минимум достиг –29,5°С и наступал четыре раза за месяц), и весь январь круглосуточно удерживались температуры ниже нуля. Снежный покров был средним (с начала до середины января – около 18–20 см). К концу месяца слой снега увеличился до 35 см. Февраль также был холодным. Снежный покров в начале и конце месяца составлял 25–35 см., тогда как в середине месяца снегопад чередовался с дождем, и при самых низких температурах во второй декаде месяца снега на почве не было. В марте морозы возобновились, и весь холодный период поверхность почвы покрывал только иней. С середины марта началось постепенное стабильное потепление. Обильные осенние осадки 2023 г., низкие отрицательные температуры, небольшой снежный покров в отдельные периоды зимы привели к плохой перези-

мовке коллекции ежевики, и, несмотря на высокую плотность укрывного материала, наблюдалось существенное подмерзание большинства сортов.

Январь 2025 г. был теплым, температура воздуха держалась на уровне нулевых, небольших положительных и небольших отрицательных значений, снежный покров отсутствовал или был минимальным. Февраль 2025 г. был наиболее холодным в зиму 2024/2025 г. с абсолютным минимумом –19,5°С при почти полном отсутствии снега. В марте (с 04.03) температуры стали устойчиво положительными. С середины марта началось постепенное потепление, ставшее к концу месяца стабильным. Теплый январь, спровоцировавший набухание почек многих сортов ежевики, отрицательные температуры февраля и отсутствие снежного покрова в зимний период привели к относительно плохой перезимовке биоресурсной коллекции сортов ежевики, с существенным подмерзанием большинства из них, несмотря на более мягкие по температурным минимумам условия этой зимы, по сравнению с двумя предыдущими, и высокую плотность укрывного материала (90 г/м^2).

Степень подмерзания образцов коллекции ежевики в описанные выше периоды представлена в таблице 3.

Таблица 3. Сравнительная оценка подмерзания образцов ежевики разных морфологических групп в зимние периоды 2022–2025 гг. (Всероссийский НИИ селекции плодовых культур)

Table 3. Comparative assessment of freezing in blackberry cultivars of different morphological groups during the winter seasons of 2022–2025 (Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding)

Название образца	Балл подмерзания		
	2022/2023 г.	2023/2024 г.	2024/2025 г.
1-я группа – пряморослые летние			
‘Agawam’*	1,0	1,0	1,0
‘Erie’*	3,5	4,0	2,0
‘Ilini Hardy’*	4,0	0	0
‘Brzezina’	1,0	3,5	1,5
‘Caddo’	3,5	4,0	3,5
‘Heaven Can Wait’	2,0	2,0	3,5
‘Natchez’	2,5	4,0	3,5
‘Navaho’	5,0	3,0	3,5
Osage	5,0	3,5	4,0
‘Ouachita’	3,5	4,0	3,5
‘Ponca’	4,0	4,0	2,5
‘Von’	2,0	2,0	3,5
среднее, M	3,2	2,9	2,7
ошибка, m	0,4	0,4	0,4
коэффициент вариации, CV,%	44,7	46,7	47,5
2-я группа – пряморослые ремонтантные			
‘Black Magic’	5,0	4,0	3,5
‘Black Gem’	4,0	4,0	4,0
‘Prime Jan’	3,0	4,0	3,5
‘Prime Jim’	5,0	4,0	3,5
‘Prime Ark-45’	5,0	4,0	3,5
‘Prime Ark Freedom’	5,0	4,0	4,0
‘Prime Ark Traveler’	5,0	4,0	3,5
‘Reuben’	5,0	5,0	4,0
среднее, M	4,6	4,1	3,7
ошибка, m	0,3	0,1	0,1
коэффициент вариации, CV,%	16,1	8,6	7,0

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

Название образца	Балл подмерзания		
	2022/2023 г.	2023/2024 г.	2024/2025 г.
3-я группа – стелющиеся			
'Columbia Star'	4,5	3,5	4,0
'Columbia Sunrise'	–	4,0	4,0
'Columbia Giant'	–	4,0	4,0
'Hall's Beauty'	–	4,0	4,0
Karaka Black	4,5	4,0	3,5
'Helen'	4,0	4,0	4,0
'Waldo'	3,0	4,0	4,0
'Wild Treasure'	4,0	4,0	4,0
среднее, M	4	3,9	3,9
ошибка, m	0,3	0,1	0,1
коэффициент вариации, CV,%	15,3	4,5	4,5
4-я группа – полупряморослые/полустелющиеся			
'Black Satin'	2,5	3,0	2,0
'Čačanska Bestrna'	2,0	3,5	2,0
'Chester Thornless'	3,5	4,0	3,5
'Gai'	–	3,0	2,5
'Kiova'	5,0	4,0	4,0
'Loch Tay'	5,0	2,5	3,0
'Polar'	1,0	3,0	3,0
'Thornfree'	4,5	2,5	3,0
'Triple Crown'	4,0	3,0	3,5
'Victoria'	–	4,0	3,0
ЭЛС 1	1,0	2,5	1,5
ЭЛС 2	2,5	3,0	2,0
среднее M	3,1	3,2	2,8
ошибка, m	0,5	0,2	0,2
коэффициент вариации, CV,%	49,2	18,2	27,4

Примечание: * – без зимнего укрытия
Note: * – without winter sheltering

Из таблицы следует, что зимостойкость сортов ежевики в условиях Орловской области варьирует в значительных пределах в зависимости от принадлежности к той или иной морфологической группе или генотипу. Наблюдается также изменчивость этого признака внутри групп сортов с пряморослым габитусом (CV более 40%) и полупряморослым/полустелющимся (CV от 18,2 до 49,2%) в зависимости от условий зимы и сорта.

Обсуждение результатов

Как показали исследования, климатические условия зимних периодов в центральной части России остаются экстремальными для выращивания ежевики. Поэтому улучшение параметров морозо- и зимостойкости новых ее сортов весьма актуально для этой зоны.

В первой группе тетраплоидных сортов – пряморослой ежевики – высокую морозо- и зимостойкость (без

зимнего укрытия) показал во все три зимы сорт 'Agawam' и в две последние зимы – сорт 'Ilini Hardy', несмотря на значительное подмерзание последнего в зиму 2022/2023 г. Это было связано с молодостью растений, высаженных весной 2022 г. и не набравших, вероятно, достаточно пластических веществ, необходимых для перезимовки. В последующие две зимы он оказался самым морозостойким. Повышенную морозостойкость в этой группе проявили бесшипные сорта, находившиеся под зимним укрытием: 'Brzezina', 'Heaven Can Wait' и 'Von'. Все эти сорта могут служить потенциальными источниками зимостойкости для создания сортов с пряморослым габитусом.

Во второй группе тетраплоидных сортов – пряморослых ремонтантных – побеги, оставленные зимовать, даже под укрытием сильно подмерзли. Это дает основание считать, что в дальнейшем рассчитывать на их летнее плодоношение (на побегах второго года жизни) в условиях центра России не имеет смысла. Основным должен быть свойственный им осенний урожай на побегах первого года, после чего побеги можно удалять, решая проблему зимостойкости и исключая необходимость укрытия.

Все гексаплоидные сорта стелющегося типа, объединенные в третьей группе, показали в условиях трех оцениваемых зим низкую морозостойкость. Однако эти сорта обладают многими достоинствами по качеству ягод и, что важно в контексте данной работы, благодаря удобным для укрытия лежачим побегам не нуждаются в специальном пригибании, в отличие от сортов с иным габитусом. Поэтому для успешного их выращивания в условиях региона исследований и создания сортов подобного типа следует вести отбор (в том числе среди новинок селекции) на повышенную морозостойкость побегов и, вероятно, одновременно совершенствовать укрытие, чтобы избежать зимнего подмерзания растений.

В четвертой группе полустелющихся/полупряморослых тетраплоидных сортов и форм ежевики также есть сорта с повышенной морозостойкостью (при условии зимнего укрытия). Это сорта 'Black Satin' и 'Čačanska Bestrna', а также два элитных сеянца, полученные во ВНИИСПК от свободного опыления сортов 'Black Satin' и 'Cheyenne', которые в перспективе могут быть участниками селекционного процесса на этот признак.

Заметим, что бесшипные сорта первой (пряморослой) группы близки по морозостойкости к сортам четвертой группы, что является, вероятно, следствием введения гена бесшипности (*ss*) от малозимостойких родителей в их геномы и, как результат, частичной утраты морозостойкости шиповатых предков с пряморослыми побегами.

При этом, хотя влияние плоидности на зимостойкость ежевики и не очевидно, но в нашем исследовании бóльшее количество генотипов с повышенными показателями зимостойкости находится в первой и четвертой изученных морфологических группах с тетраплоидным набором хромосом (2n = 4x = 28), а пониженная зимостойкость ремонтантных тетраплоидов, в первую очередь, связана с плодоношением на побегах в год их образования.

Таким образом, в настоящее время для решения проблемы зимостойкости ежевики в условиях средней полосы России имеется хоть и небольшой, но перспективный и разнообразный генетический материал, который может служить базой для селекционного совершенствования сортов в указанном направлении.

В связи с этим можно рассматривать в качестве ориентиров для селекции как минимум три модели сортов ежевики для обеспечения зимостойкости в среднерусском регионе с разными типами роста:

- ***первая модель*** – высокозимостойкие сорта с пряморослым компактным габитусом, бесшипные, не требующие опор, раннеспелые, с дружным созреванием ягод, продолжительным периодом покоя, предназначенные для неукрывной культуры;
- ***вторая модель*** – сорта, плодоносящие на побегах текущего года (ремонтантные), бесшипные, с раннеосенним (до наступления осенних заморозков) созреванием ягод и морозостойкой подземной частью, также для выращивания без зимнего укрытия;
- ***третья модель*** – раннеспелые сорта со стелющимися гибкими побегами, среднезимостойкие, для укрывной культуры.

Сорта промежуточной по характеру роста побегов группы (полупряморослые и полустелющиеся), в большинстве своем имеющие среднюю зимостойкость в этой климатической зоне, нуждаются в укрытии побегов на зиму и их специальной формировке. Поэтому они больше пригодны для выращивания в южных регионах садоводства либо под зимним укрытием в холодном климате, пока не созданы более выносливые сорта. Однако, как источники многих ценных признаков для создания новых сортов, такие генотипы, безусловно, могут и должны использоваться во всех зонах, где подобные исследования ведутся. Следует учитывать также то, что подобных сортов в настоящее время большинство и среди них имеются формы с повышенной морозостойкостью, что было отмечено и в нашем исследовании.

Основные направления селекции ежевики и параметры сортов для современного промышленного выращивания, в том числе в условиях центра России, были подробно рассмотрены нами ранее (Gruner, Kornilov, 2020) с использованием опыта ведущих селекционеров мира (Clark, Finn, 2011; Finn, Clark, 2012).

Для обозначенных выше моделей в любой зоне выращивания важны все показатели, обеспечивающие будущим сортам востребованность и конкурентоспособность. Это, в первую очередь, высокие товарные и вкусовые качества ягод, пригодность их к транспортировке и хранению.

Заключение

Зимние периоды 2022/2023, 2023/2024 и 2024/2025 г. с критическими для ежевики отрицательными температурами позволили оценить морозостойкость сортов биоресурсной коллекции ежевики в условиях Орловской области.

Анализ степени подмерзания сортообразцов дает возможность заключить, что морозо- и зимостойкость ежевики в климате региона варьируют в значительных пределах. Наибольшая изменчивость по этим показателям наблюдается в группах тетраплоидных сортов с пряморослым и полупряморослым/полустелющимся габитусами. В этих же группах выявлены сорта, способные переносить условия среднерусских зим при укрывном ('Brzezina', 'Heaven Can Wait', 'Von', 'Black Satin', 'Čačanska Bestrna' и элитные сеянцы, полученные во ВНИИСПК от свободного опыления сортов 'Black Satin' и 'Cheyenne') и неукрывном (сорта 'Agawam', 'Ilini Hardy') возделывании. Эти сорта и формы потенциально пригодны для использования в селекции на зимостойкость.

Перспективны для решения проблемы зимостойкости и сорта с плодоношением на побегах текущего года с раннеосенним созреванием ягод, учитывая возможность подзимнего скашивания побегов после отдачи ими урожая. Однако для летнего урожая такие сорта не пригодны из-за сильного зимнего подмерзания.

Сорта с лежачими (стелющимися) побегами наиболее удобны для зимнего укрытия, поэтому могут рассматриваться как потенциально пригодные для селекционного совершенствования в направлении укрывной культуры, особенно в зонах с устойчивым снежным покровом, создающим дополнительную защиту от низких зимних температур.

В связи с этим три предлагаемые модели сортов ежевики для условий центра России имеют реальную стартовую базу в собранной коллекции и могут служить ориентиром для селекционеров указанного региона.

References / Литература

Clark J.R. 'Prime-Ark® Freedom' primocane-fruiting thornless blackberry. *HortScience*. 2014;49(8):1097-1101. DOI: 10.21273/ HORTSCI.49.8.1097

Clark J.R., Finn C.E. Blackberry breeding and genetics. *Fruit, Vegetable and Cereal Science and Biotechnology*. 2011;5(1):27-43.

Clark J.R., Moore J.N. 'Natchez' thornless blackberry. *HortScience*. 2008;43(6):1897-1899. DOI: 10.21273/HORTSCI.43.6.1897

Clark J.R., Moore J.N. 'Ouachita' thornless blackberry. *HortScience*. 2005;40(1):258-260. DOI: 10.21273/HORTSCI.40.1.258

Clark J.R., Worthington M., Ernst T. 'Caddo' thornless blackberry. *HortScience*. 2019;54(9):1632-1636. DOI: 10.21273/HORTSCI14119-19

Connor A.M., Finn C., Alspach P.A. Genotypic and environmental variation in antioxidant activity and total phenolic content among blackberry and hybrid berry cultivars. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 2005;130(4):527-533. DOI: 10.21273/JASHS.130.4.527

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).

Evdokimenko S.N., Kulagina V.L. Evaluation of blackberry varieties and raspberry-blackberry hybrids in conditions of the Bryansk Region. *Horticulture and Viticulture*. 2015;(4):20-23. [in Russian] (Евдокименко С.Н., Кулагина В.Л. Оценка сортов ежевики и малино-ежевичных гибридов в условиях Брянской области. *Садоводство и виноградарство*. 2015;(4):20-23).

Finn C.E., Clark J.R. Blackberry. In: M.L. Badenes, D.H. Byrne (eds). *Fruit Breeding*. New York, NY: Springer Science; 2012. p.151-190. Available from: https://www.researchgate.net/profile/Marco-Conedera/publication/318912505_Chestnut/links/5989a7daa6fdcc75626366fb/Chestnut.pdf [accessed Mar. 15, 2026].

Finn C.E., Strik B.C., Yorgey B.M., Peterson M.E., Jones P.A., Martin R.R. 'Columbia Sunrise' thornless trailing blackberry. *HortScience*. 2018;53(2):256-260. DOI: 10.21273/HORTSCI12673-17

Finn C.E., Strik B.C., Yorgey B.M., Peterson M.E., Lee J., Martin R.R. et al. 'Columbia Star' thornless trailing blackberry. *HortScience*. 2014;49(8):1108-1112. DOI: 10.21273/HORTSCI.49.8.1108

Gruner L.A. Adaptive capabilities of blackberries in conditions of Orel region. *Contemporary Horticulture*. 2019;(3):27-41. [in Russian] (Грюнер Л.А. Адаптационные возможности ежевики в условиях Орловской области. *Современное садоводство*. 2019;(3):27-41). DOI: 10.24411/2312-6701-2019-10305

Gruner L.A., Kornilov B.B. Priority trends and prospects blackberry breeding in conditions of Central Russia. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2020;24(5):489-500. DOI: 10.18699/VJ20.641

Kazakov I.V., Gruner L.A., Kichina V.V. Raspberry, blackberry, and their hybrids (Malina, yezhevika i ikh gibridy). In: E.N. Sedov, T.P. Ogoltsova (eds). *Program and Methodology of Variety Studies for Fruit, Berry and Nut Crops (Programma i metodika sortoizucheniya plodovykh, yagodnykh i orekhoplodnykh kultur)*. Orel: VNIISPK; 1999. p.374-395. [in Russian] (Казаков И.В., Грюнер Л.А., Кичина В.В. Малина, ежевика и их гибриды. В кн.: *Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур* / под ред. Е.Н Седова, Т.П. Огольцовой. Орел: ВНИИСПК; 1999. С.374-395).

Kichina V.V., Kazakov I.V., Gruner L.A. Raspberry and blackberry breeding (Selektsiya maliny i yezheviki). In: E.N. Sedov, T.P. Ogoltsova (eds). *Program and Methodology of Variety Studies for Fruit, Berry and Nut Crops (Programma i metodika sortoizucheniya plodovykh, yagodnykh i orekhoplodnykh kultur)*. Orel: VNIISPK; 1999. p.368-386. [in Russian] (Кичина В.В., Казаков И.В., Грюнер Л.А. Селекция малины и ежевики. В кн.: *Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур* / под ред. Е.Н Седова, Т.П. Огольцовой. Орел: ВНИИСПК; 1999. С.368-386).

Kolbas N.Y., Silva M.A., Teissedre P.L., Reshetnikov V.N., Anthocyanins and antioxidant activity of fruits certain representatives of genus *Rubus*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus (Biological Series)*. 2012;(1):5-10. [in Russian] (Колбас Н.Ю., Силва М.А., Тэссэдр П.Л., Решетников В.Н. Антоцианы и антиоксидантная активность плодов некоторых представителей рода *Rubus*. *Известия национальной академии наук Беларуси. Серия биологических наук*. 2012;(1):5-10).

Ladyzhenskaya O.V., Anyskyna T.S., Kryuchkova V.A. Comparative evaluation of winter hardiness of blackberries when covered for winter and treated with the natural organomineral phytomodulator "Beliy Zhemchug Antifreeze". *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2023;1(6):14-25. [in Russian] (Ладыженская О.В., Аниськина Т.С., Крючкова В.А. Сравнительная оценка зимостойкости ежевики при укрытии на зиму и обработке природно-растительным комплексом «Белый Жемчуг Антифриз». *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2023;1(6):14-25). DOI: 10.26897/0021-342X-2023-6-14-25

Lee J. Blackberry fruit quality components, composition, and potential health benefits. In: H.K. Hall, R.C. Funt (eds). *Blackberries and Their Hybrids*. Boston, MA: CABI; 2017. p.49-62. DOI: 10.1079/9781780646688.0049

Makarkina M.A., Vetrova O.A., Gruner L.A., Kornilov B.B. Bioactive compounds in blackberry fruits under the conditions of Central Russia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2022;183(2):58-66. [in Russian] (Макаркина М.А., Ветрова О.А., Грюнер Л.А., Корнилов Б.Б. Биологически активные вещества в плодах ежевики в условиях средней полосы России. *Труды по при-*

кладной ботанике, генетике и селекции. 2022;183(2):58-66). DOI: 10.30901/2227-8834-2022-2-58-66

Medical Statistics (Meditsinskaya Statistika): [website]. [in Russian] (Медицинская Статистика: [сайт]). URL: https://medstatistic.ru [дата обращения: 03.03.2026].

Ourecky D.K. Brambles. In: Kh.K. Enikeev (ed.). *Breeding of Fruit Plants (Selektsiya plodovykh rasteniy)* (translation from English). Moscow: Kolos; 1981. p.166-179. [in Russian] (Оурецки Д.К. Ежевика. В кн.: *Селекция плодовых растений* / пер. с англ. под ред. Х.К. Еникеева. Москва: Колос; 1981. С.166-179).

Stanisavljevic M. New small fruit cultivars from Cacak: 1. The new blackberry (*Rubus* sp.) cultivar 'Cacanska Bestrna'. *Acta Horticulture*. 1999;505:291-296. DOI: 10.17660/ActaHortic.1999.505.37

Telepenko Y.Y. Frost-resistance of the blackberry (*Rubus* subg. *Eubatus* Focke) cultivars in the Forest-Steppe zone of Ukraine. *Plant Varieties Studying and Protection*. 2018;14(1):124-131. [in Ukrainian] (Телепенько Ю.Ю. Морозостійкость сортів ожины (*Rubus* subg. *Eubatus* Focke) в умовах Західного Лісостепу Украіни. *Plant Varieties Studying and Protection*. 2018;14(1):124-131). DOI: 10.21498/2518-1017.14.1.2018.126521

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

Wójcik-Seliga J., Wójcik-Gront E. Evaluation of blackberry and hybrid berry cultivars new to Polish climate. *Horticultural Science*. 2013;40(2):88-91. DOI: 10.17221/1/2012-HORTSCI

Информация об авторе

Лидия Андреевна Грюнер, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт селекции плодовых культур, 302530 Россия, Орловская область, Орловский район, д. Жилина, gruner@orel.vniispk.ru, https://orcid.org/0000-0001-6551-4369

Information about the author

Lidia A. Gruner, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding, Zhilina Village, Orlovsky District, Orel Province 302530, Russia, gruner@orel.vniispk.ru, https://orcid.org/0000-0001-6551-4369

Статья поступила в редакцию 24.03.2026; одобрена после рецензирования 29.04.2026; принята к публикации 12.05.2026.
The article was submitted on 24.03.2026; approved after reviewing on 29.04.2026; accepted for publication on 12.05.2026.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 635.112:635.15:57.03
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o2

(cc) BY

Мониторинг динамики содержания беталаинов столовой свеклы (*Beta vulgaris* L.) в течение длительного хранения

А. М. Зарецкий, Д. В. Соколова, А. Е. Соловьева

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

Автор, ответственный за переписку: Александр Михайлович Зарецкий, 744121296@mail.ru

Актуальность. Использование беталаинов в качестве натуральных пищевых красителей сталкивается с трудностями, связанными со стабильностью их химической структуры в процессе хранения и, следовательно, их красящей способностью. Актуальность исследования обусловлена недостаточной изученностью закономерностей изменения концентрации беталаинов в течение длительного хранения.
Материалы и методы. В исследовании проанализированы 52 образца столовой свеклы из коллекции ВИР с интенсивной красной окраской корнеплодов. Количественное определение беталаинов проводили спектрофотометрическим методом.
Результаты и заключение. Содержание пигментов в исследуемых образцах колебалось от 130 до 1526 мг/100 г сухого веса, из них: бетацианинов – от 82 до 1271 мг/100 г, бетаксантинов – от 23 до 494 мг/100 г. Методом кластерного анализа все образцы были разделены на 4 группы в зависимости от общего содержания беталаинов. Получены данные по ежемесячной динамике беталаинов в корнеплодах столовой свеклы при длительном хранении. В первый месяц после уборки и закладки корнеплодов на хранение наблюдался рост содержания беталаинов примерно на 40%. В среднем при длительном хранении деградация пигмента составила 28%. Снижение беталаинов происходило преимущественно за счет уменьшения количества бетацианинов. Среди изученных образцов наибольший интерес для получения красителя непосредственно после уборки и в первый месяц хранения представляет сорт ‘Генеральская’ (к-3894, Россия). Сорта ‘Комбат’ (к-4032, Россия) и ‘Маруся’ (к-3982, Россия) показали себя как наиболее стабильные источники пигмента на протяжении всего срока хранения.

Ключевые слова: свекла столовая, пигменты, бетацианины, бетаксантины, длительное хранение

Благодарности: материал получен 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». Исследования проведены в рамках государственного задания FGEM-2025-0007 «Клеточные технологии для расширения селекционного потенциала культур овощного направления использования».

Для цитирования: Зарецкий А.М., Соколова Д.В., Соловьева А.Е. Мониторинг динамики содержания беталаинов столовой свеклы (*Beta vulgaris* L.) в течение длительного хранения. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(2):58-68. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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.

© Зарецкий А.М., Соколова Д.В., Соловьева А.Е., 2026

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o2

Monitoring of the betalain content dynamics in table beet (*Beta vulgaris* L.) during long-term storage

Alexander M. Zaretsky, Diana V. Sokolova, Alla E. Solovyeva

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

Corresponding author: Alexander M. Zaretsky, 744121296@mail.ru

Background. The use of betalains as natural food colorants faces difficulties related to the stability of their chemical structure during storage and, consequently, their coloring ability. The relevance of the study is due to insufficient knowledge of the patterns of changes in betalain concentration during long-term storage.
Materials and methods. The study analyzed 52 table beet accessions with intense red root color from the VIR collection. Quantitative measurement of betalains was carried out spectrophotometrically.
Results and conclusion. The content of these pigments in the studied accessions ranged from 130 to 1526 mg/100 g dry weight, specifically: betacyanins varied from 82 to 1271 mg/100 g, and betaxanthins from 23 to 494 mg/100 g. Using cluster analysis, all accessions were divided into 4 groups depending on the total betalain content. Data were obtained on the monthly dynamics of betalain content in table beet roots during long-term storage. In the first month after harvesting and placing the roots into storage, an increase in betalain content of approximately 40% was observed. On average, pigment degradation during long-term storage was 28%. The decrease in betalains occurred mainly due to a reduction in the amount of betacyanins. Among the studied accessions, cv. 'Generalskaya' (k-3894, Russia) is of greatest interest for obtaining the colorant immediately after harvesting and in the first month of storage. Cvs. 'Kombat' (k-4032, Russia) and 'Marusya' (k-3982, Russia) turned out to be the most stable sources of the pigment throughout the entire storage period.

Keywords: table beet; pigments, betacyanins, betaxanthins, long-term storage

Acknowledgments: the material was obtained as part of the state task according to the thematic plan of VIR, Project 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". The research was conducted within the framework of the state task, Project FGEM-2025-0007 "Cell technologies to expand the breeding potential of crops for vegetable use".

For citation: Zaretsky A.M., Sokolova D.V., Solovyeva A.E. Monitoring of the betalain content dynamics in table beet (*Beta vulgaris* L.) during long-term storage. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(2):58-68. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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

Свекла столовая – ценная овощная культура, обладающая высокой урожайностью и длительной лежкостью корнеплодов, а также содержащая комплекс биологически активных веществ, включая витамины и другие антиоксиданты (Burenin, 2007; Litvinov, 2008). Важнейшими компонентами, определяющими ее свойства, являются беталаины (Herbach et al., 2004; Timakova, Dolgopolova, 2020).

Беталаины – водорастворимые растительные пигменты, относящиеся к алкалоидам и синтезирующиеся в вакуолях клеток растений порядка Caryophyllales (свекла столовая, опунция, амарант, базелла, питахайя, уллюко, портулак, миртиллокактус и др.) (Strack et al., 2003; Minzanova et al., 2010; Paunovic et al., 2020). Основной сырьевой источник данных пигментов – корнеплоды столовой свеклы (Shachek et al., 2023). Эти соединения не только придают свекле характерную окраску, но и выполняют защитную функцию, повышая устойчивость растений к стрессовым факторам, таким как перепады температур, засоление почв и механические повреждения (Vogt et al., 1999; Sepúlveda-Jiménez et al., 2004; Wang et al., 2006; Hayakawa, Agarie, 2010; Casique-Arroyo et al., 2014; Ustinova et al., 2021; Sokolova et al., 2022).

Беталаины синтезируются в растениях из тирозина посредством образования беталамовой кислоты и делятся на две группы с различной окраской: фиолетово-бордовые – бетацианины и желтые – бетаксантины (Strack et al., 2003; Khan, Giridhar, 2015; Slimen et al., 2017). Наиболее распространенным в столовой свекле является бетанин – основной компонент пищевого красителя красного цвета Е-162, широко применяемого в пищевой, косметической и фармацевтической промышленности (Koryt-ko, Tolkachev, 2020; Shachek et al., 2023). Устойчивость и интенсивность окраски продуктов зависит от концентрации пигментов, pH среды, продолжительности нагревания и других технологических параметров (Valeeva et al., 2019; Paunovic et al., 2020; Chesnokova et al., 2023).

Содержание беталаинов в корнеплодах сопряжено с генотипом и условиями выращивания (Sokolova, 2022). При этом свекла способна сохранять потребительские качества в течение 7–8 месяцев, что делает ее перспективным сырьем в производстве натуральных красителей. В связи с этим изучение динамики содержания беталаинов в процессе хранения представляет особый интерес. *Целью работы* являлось исследование динамики накопления и деградации пигментов в корнеплодах столовой свеклы в течение длительного хранения.

Материалы и методы

Исследование динамики содержания пигментов в течение длительного хранения проводилось с использованием 52 образцов столовой свеклы из коллекции ВИР, отобранных по критерию максимальной интенсивности окраски корнеплодов (табл. 1). В исследовании преобладали сорта российской селекции (65%), среди зарубежных сортов наибольшую долю (27%) составили образцы голландского происхождения. Линейный материал в изучаемой выборке был получен путем четырех циклов инбридинга сорта ‘Валента’ (к-3050, Россия).

Образцы выращивались на естественном фоне в овощном севообороте на территории научно-производственной базы «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» (г. Пушкин, Санкт-Петербург) в 2023 г. Послеуборочное хранение корнеплодов осуществлялось в овощехранилище ВИР при постоянной температуре +2°C.

Характеристика погодных условий вегетационного периода представлена на рисунке 1. Среднемесячные

Таблица 1. Список опытных образцов столовой свеклы
Table 1. List of the studied table beet accessions

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Название образца / Accession name	Происхождение / Origin	Форма корнеплода / Root shape	Селекционный статус / Breeding status
–	Линия Валента	Россия	Округло-овальная	Линия
–	Линия 572/2	Россия	Округло-овальная	Линия
–	Линия 273/9	Россия	Округлая	Линия
–	Линия 270/6	Россия	Округло-овальная	Линия
–	Линия 279/9	Россия	Округло-овальная	Линия
461	‘Early Wonder’	США	Округло-плоская	Сорт
579	‘Detroit Dark Red’	Британия	Округло-овальная	Сорт
597	‘Egyptain Turnip Ronted’	Нидерланды	Округло-плоская	Сорт
621	‘Rodbeta Egyptsh Pluntrund	Швеция	Округло-овальная	Сорт
1585	‘Полярная Плоская’	Россия	Округло-плоская	Сорт
1586	‘Северный Шар’	Россия	Округло-плоская	Сорт
1793	‘Improved Dark Red’	Канада	Округло-овальная	Сорт
1937	‘Burpee’s Red Ball’	США	Округлая	Сорт
3024	‘Bikores’	Нидерланды	Округлая	Сорт
3151	‘Бордо Односемянная’	Россия	Округло-овальная	Сорт

Таблица 1. Окончание
Table 1. The end

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Название образца / Accession name	Происхождение / Origin	Форма корнеплода / Root shape	Селекционный статус / Breeding status
3183	Свекла столовая	Мадагаскар	Округлая	Местный образец
3184	'Detroit Nero RS'	Нидерланды	Округло-овальная	Сорт
3213	'Улан Манжи'	Монголия	Плоская	Местный образец
3215	'Багряный'	Украина	Коническая	Сорт
3599	'Egypte'	Алжир	Плоская	Сорт
3600	'Dwergina'	Нидерланды	Овально-округлая	Сорт
3601	Местная	Абхазия	Цилиндрическая	Местный образец
3627	'Detroit Dark Red Morse'	Мексика	Округло-овальная	Сорт
3628	'Norton'	Нидерланды	Овально-округлая	Сорт
3692	'Бордовая ВНИИО'	Россия	Округло-овальная	Сорт
3693	'Карина ВНИИО'	Россия	Округлая	Сорт
3694	'Деметра ВНИИО'	Россия	Округлая	Сорт
3695	'Жуковчанка ВНИИО'	Россия	Округло-овальная	Сорт
3698 St	'Русская Односемянная'	Россия	Овально-округлая	Сорт
3888	'Цыганочка'	Россия	Округло-овальная	Сорт
3889	'Темная Ночь'	Россия	Округлая	Сорт
3890	'Темная Лошадка'	Россия	Округлая	Сорт
3891	'Уральский Рафинад'	Россия	Округлая	Сорт
3892	'Уральский Борщ'	Россия	Округлая	Сорт
3894	'Генеральская'	Россия	Цилиндрическая	Сорт
3895	'Матушка Матреша'	Россия	Цилиндрическая	Сорт
3977	'Фалькон F1'	Япония	Округлая	Гибрид F1
3982	'Маруся'	Россия	Округлая	Сорт
4014	'Герман'	Россия	Овально-округлая	Сорт
4019	'Наоми'	Россия	Округло-овальная	Сорт
4020	'Рубиновая Королева'	Россия	Округло-плоская	Сорт
4021	'Красный Шар'	Россия	Овально-округлая	Сорт
4022	'Шоколадница'	Россия	Округло-овальная	Сорт
4023	'Мечта Кулинара'	Россия	Овально-округлая	Сорт
4024	'Вишневая Королева'	Россия	Цилиндрическая	Сорт
4025	'Гранатовый Шар'	Россия	Округло-овальная	Сорт
4027	'Барон'	Россия	Округло-плоская	Сорт
4028	'Королевский Пурпур'	Россия	Округло-плоская	Сорт
4030	'Герман F1'	Россия	Округло-овальная	Гибрид F1
4032	'Комбат'	Россия	Овально-округлая	Сорт
4033	'Санькина Любовь'	Россия	Цилиндрическая	Сорт
4091	'Бе 10908 F1'	Франция	Овально-округлая	Гибрид F1

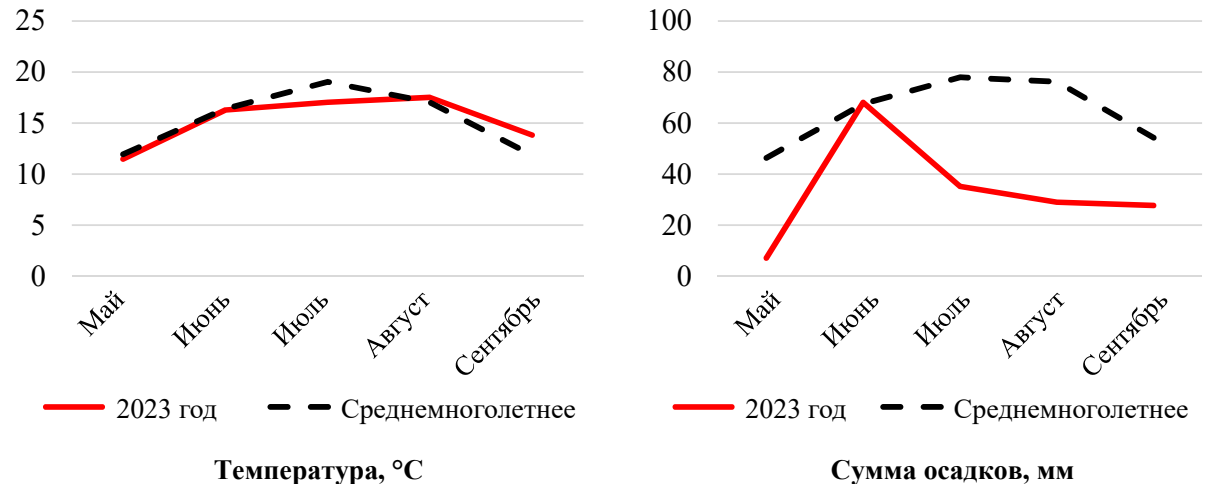


Рис. 1. Погодные условия вегетационного периода 2023 г. (г. Пушкин, Санкт-Петербург)
Fig. 1. Weather conditions for the 2023 growing season (Pushkin, St. Petersburg)

значения температуры практически не отличались от среднемноголетних значений, за исключением июля, когда температура была ниже на 2°С.

В 2023 г. практически в течение всего вегетационного периода наблюдался дефицит атмосферной влаги, за исключением июня, когда количество осадков соответствовало среднемноголетней норме для Ленинградской области.

Биохимический анализ выращенных корнеплодов проводился ежемесячно на протяжении всего периода хранения образцов (октябрь – апрель) в лаборатории биохимии и молекулярной биологии ВИР. Для исследования брали среднюю пробу из 3–5 корнеплодов каждого образца. Материал предварительно измельчали при помощи кухонного комбайна КП 1580Е-113 (Россия). Беталаины определяли согласно методу И. И. Саенко с коллегами (Saenko et al., 2012). Для извлечения пигментов брали навеску 1 г. Экстракция проводилась порциями 2-процентной муравьиной кислоты при гомогенизации в фарфоровой ступке под слоем экстрагента. Полученный экстракт фильтровали через бумажный фильтр, собирали в мерную колбу и доводили до метки экстрагентом. Измерения проводили относительно экстрагента на спектрофотометре UNICO 2800 (США) в диапазоне длин волн: 542 нм – для бетацианинов и 480 нм – для бетаксантинов. Суммарное содержание бетацианинов (БЦ) в мг/100 г сухого веса рассчитывали по формуле:

$$БЦ = \frac{A1 \times V \times M1}{E1 \times L \times m} \times 100,$$

где A1 – абсорбция при максимуме поглощения бетацианинов; V – объем экстракта в мл; M1 – молярная масса бетанина, 550 г/моль; E1 – молярный коэффициент погашения бетацианинов при максимуме поглощения, 60 000; L – длина оптического пути, 1 см; m – масса навески.

Суммарное содержание бетаксантинов (БК) в мг/100 г сухого веса в пересчете на вульгаксантин-I вычисляли по формуле:

$$БК = \frac{(A2 - k \times A1) \times V \times M2}{E2 \times L \times m} \times 100,$$

где A2 – абсорбция при максимуме поглощения бетаксантинов; k – коэффициент пересчета (0,323); M2 – молярная масса вульгаксантина-I, 339 г/моль; E2 – молярный коэффициент погашения бетаксантинов при максимуме поглощения; L – длина оптического пути 1 см; m – масса навески. Общее содержание беталаинов (ОСБ) рассчитывали как сумму БЦ и БК.

Статистическая обработка (среднее значение, коэффициент вариации, стандартное отклонение) выполняли с использованием программного пакета Statistica v.10. (StatSoft, США). Средние значения данных с нормальным распределением сравнивали с помощью однофакторного дисперсионного анализа. Кластерный анализ проведен с помощью метода невзвешенных средних в программе PAST (Hammer et al., 2001).

Результаты и обсуждения

Надо отметить крайне малое количество исследований по теме данной публикации. Близкие работы касаются в основном кинетики деградации выделенных беталаинов и воздействия различных условий при хранении пигмента (Das et al., 2018; Miyagawa et al., 2021; Yang et al., 2021; Lin et al., 2022). Содержание беталаинов в корнеплодах столовой свеклы в нашем исследовании близко к результатам, опубликованными в работах ряда авторов (Herbach et al., 2006; Ustinova et al., 2021; Shachek et al., 2023). Диапазон содержания беталаинов варьировал от 130 до 1526 мг/100 г сухого вещества, из них на бетацианины приходилось от 82 до 1271 мг/100 г, на бетаксантины – от 23 до 494 мг/100 г.

На основании кластерного анализа образцы, взятые в изучение, по содержанию беталаинов распределились на 4 группы (рис. 2), которые существенно различались между собой (табл. 2).

В первую группу вошли пять образцов со средним содержанием беталаинов 977,58 мг/100 г: ‘Уральский Борщ’ (к-3892, Россия), ‘Генеральская’ (к-3894, Россия), ‘Наоми’ (к-4019, Россия), ‘Мечта Кулинара’ (к-4023, Россия) и ‘Санькина Любовь’ (к-4033, Россия). Наибольшее содержание пигментов отмечено у сортов, обладающих цилиндрической формой корнеплода: ‘Генеральская’ и ‘Санькина Любовь’. Наибольшее количество образцов (26) вошло во вторую группу, содержание беталаинов в которой в среднем составило 753,05 мг/ г. Особых отличительных черт, за исключением содержания пигмента в корнеплодах (в среднем 598,22 мг/100 г), у десяти образцов из третьей группы отмечено не было. В четвертую группу с низким содержанием пигментов

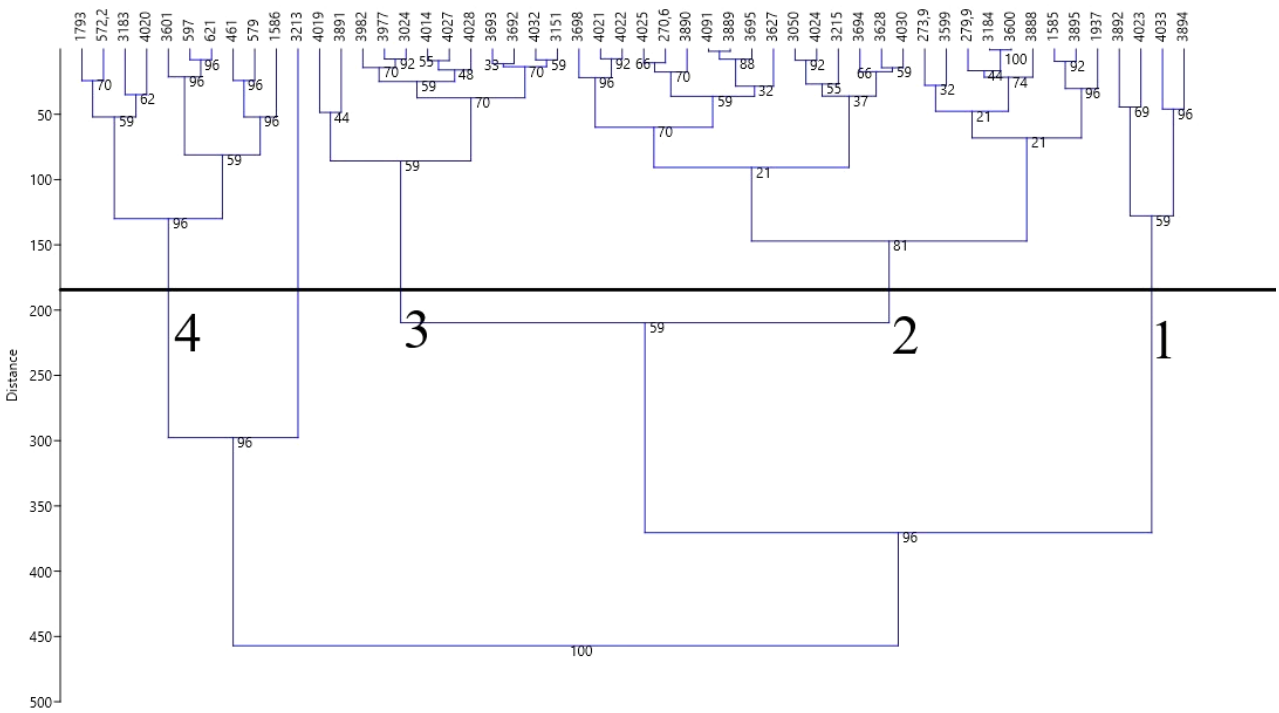


Рис. 2. **Дендрограмма распределения образцов столовой свеклы по содержанию беталаинов (методом попарного невзвешенного среднего)**

Fig. 2. **Cluster dendrogram of table beet accessions based on betalain content (unweighted pair group method with arithmetic mean)**

Таблица 2. **Характеристика ранжированных групп по содержанию беталаинов, мг/100 г**

Table 2. **Characteristics of the ranked groups according to their betalain content, mg/100 g**

Группа по содержанию бетацианинов / Betacyanin content group	Количество образцов, шт. / Number of accessions, pcs.	Mean ± SD		
		Беталаины / Betalains	Бетацианины / Betacyanins	Бетаксантины / Betaxanthins
1	5	997,26 ± 101,06	796,73 ± 91,57	200,54 ± 12,95
2	26	753,05 ± 64,19	594,95 ± 55,04	158,10 ± 12,54
3	10	598,22 ± 36,06	476,22 ± 36,78	121,70 ± 8,84
4	11	393,46 ± 88,10	301,15 ± 73,68	92,30 ± 18,79
Mean ± SD		670,69 ± 189,98	529,43 ± 156,29	141,26 ± 35,42
CV,%		28,33	29,52	25,07
HCP_{05} / LSD_{05}		133,90	116,25	26,06

Примечание: Mean – среднее по группе; SD – стандартное отклонение; CV – коэффициент вариации; HCP_{05} – наименьшая существенная разница

Note: Mean – group mean; SD – standard deviation; CV – coefficient of variation; LSD_{05} – least significant difference

(301,15 мг/100 г) преимущественно вошли сорта ранней селекции (1920–1980 гг.) и образцы местного происхождения.

В результате систематических исследований в течение 7–8 месяцев дана оценка динамики содержания беталаинов в корнеплодах столовой свеклы при длительном хранении. Выявлено достоверное снижение показателей содержания пигмента (в среднем на 27,95%), что соответствует выводам, сделанным ранее (Koldaev, 2023) (рис. 3). Так, в работе Yang Wei et al. (2021) приводятся данные кинетических изменений выделенного пигмента при длительном хранении, подтверждающие наши выводы.

В конце первого месяца хранения наблюдалось увеличение содержания беталаинов в корнеплодах в среднем на 40,3%, что, вероятно, связано со стрессовой реакцией растений в ответ на механическую уборку, транспортировку и резкое изменение температурного режи-

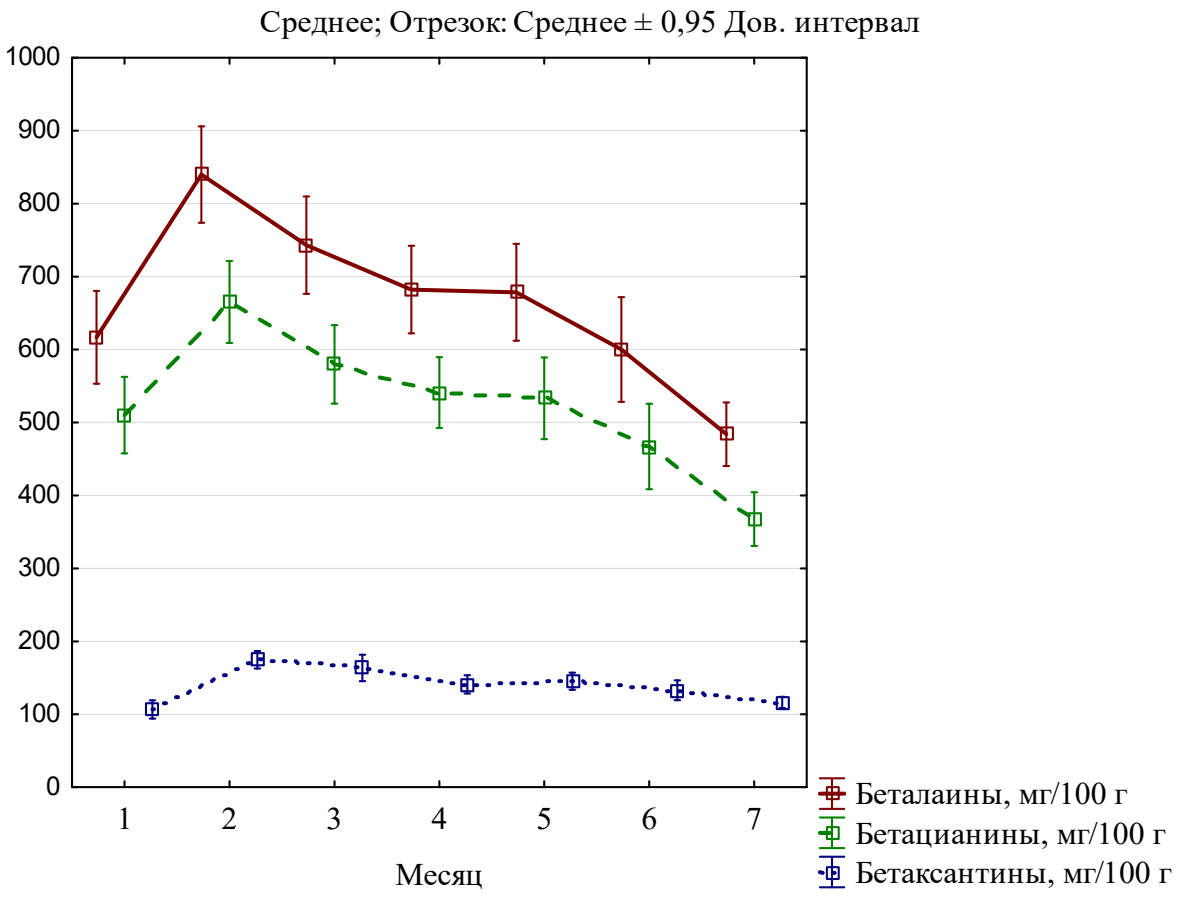


Рис. 3. Динамика содержания беталаинов при хранении в корнеплодах столовой свеклы

Fig. 3. Betalain content dynamics in table beet roots during storage

ма. Затем отмечено постепенное снижение содержания беталаинов, при этом в последние месяцы хранения процесс деградации пигментов ускорялся, что, предположительно, связано с активацией физиологических процессов в корнеплодах перед началом второго года вегетации. Снижение беталаинов происходило преимущественно за счет уменьшения количества содержания бетацианинов (рис. 4). Динамика бетаксантинов отличалась – количество желтых пигментов после уборки и закладки на хранение также возрастало, но при хранении деградация их была незначительной. Содержание бетаксантинов в последний месяц хранения было выше показателя на стадии технической спелости (уборки) на 8,95%. При этом степень деградации беталаинов в образцах свеклы различалась в зависимости от группы. Так, разница доли потерянного пигмента между образцами из первой и четвертой групп составила 4,50% (см. рис. 4).

Динамика изменения содержания пигментов в корнеплодах образцов разных групп имела существенные различия. В первой группе уровень беталаинов и бетацианинов после подъема по истечении 30 дней хранения менялся скачкообразно. В остальных группах снижение концентрации пигментов было более равномерным. С октября по апрель деградация пигмента составила в среднем 40%. Наибольшие потери (47%) отмечены в третьей группе. Для первой и второй групп они были минимальными (38%).

Натуральный пищевой краситель «Свекольный красный» (Е-162) производится из бетанина столовой свеклы, составляющего около 70% среди бетацианинов (Kopytko, Tolkachev, 2020; Shachek et al., 2023). В связи с этим особый интерес представляют образцы со стабильно высоким содержанием бетацианинов при длительном хранении, что дает возможность его выделения в течение продолжительного времени.

Для дальнейшего исследования были отобраны наиболее перспективные образцы отечественной селекции с высоким содержанием пигментов из первой и второй групп (табл. 3).

Образцы ‘Генеральская’ и ‘Санькина Любовь’ обладали максимальным содержанием беталаинов: 1158,62 мг/100 г и 1024,26 мг/100 г соответственно. Помимо этого, сорта ‘Генеральская’, ‘Маруся’ (к-3982, Россия) и ‘Комбат’ (к-4032, Россия) в течение хранения имели наиболее стабильные показатели пигментов (CV = 17,63%, 15,76% и 18,18% соответственно). Динамика изменения содержания пигментов в процессе длительного хранения у вышеуказанных сортов продемонстрирована на рисунке 5.

Сорта ‘Генеральская’ и ‘Герман’ (к-4014, Россия) обладали наибольшим содержанием бетацианинов на стадии технической спелости, превосходя другие сорта в 1,5 и более раза. В процессе хранения у сорта ‘Генеральская’ содержание красных пигментов было стабильно высоким, а у образца ‘Герман’, наоборот, наблюдалась резкая деградация пигмента, которая продолжалась в последующие месяцы хранения. Начиная с января у сорта ‘Герман’ наблюдалось самое низкое содержание бетацианинов по сравнению с другими образцами данной группы. Особый интерес представляет сорт ‘Санькина Любовь’,

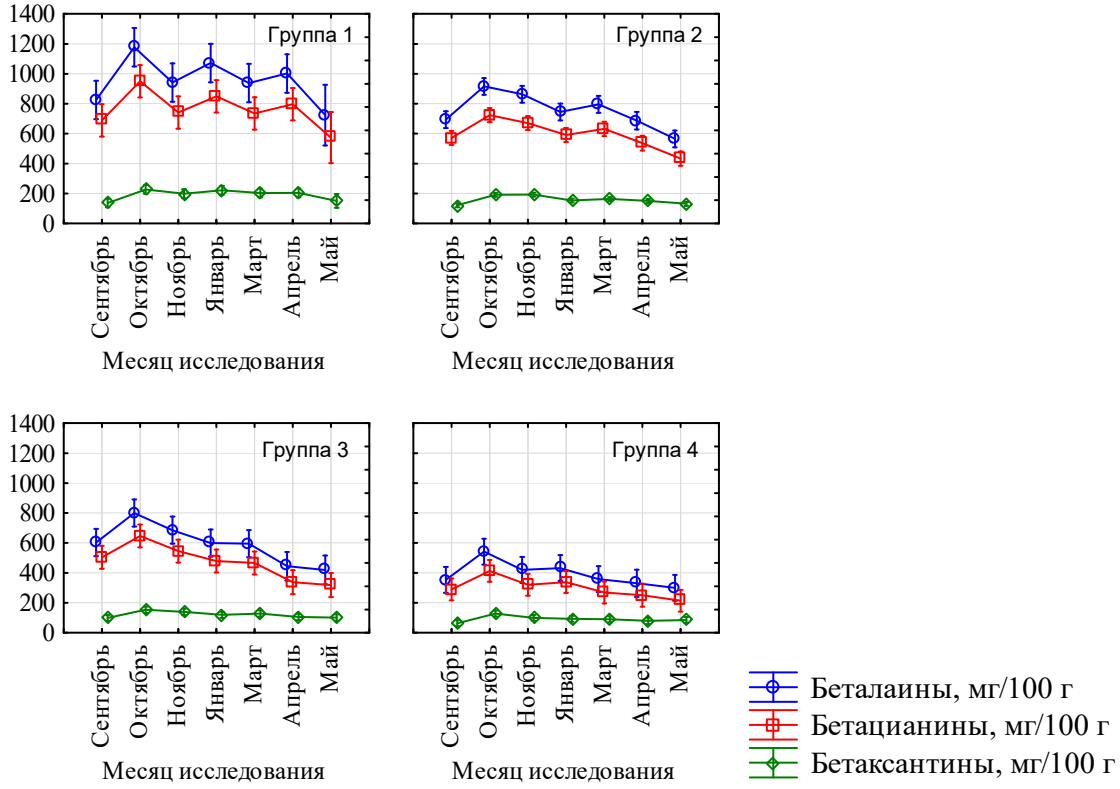


Рис. 4. Динамика содержания беталаинов при хранении в корнеплодах столовой свеклы у разных групп
Fig. 4. Betalain content dynamics in table beet roots of different groups during storage

Таблица 3. Содержание беталаинов в корнеплодах перспективных образцов столовой свеклы, мг/100 г
Table 3. Betalain content in the roots of promising table beet accessions, mg/100 g

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Образец / Accession	Mean ± SD		
		Беталаины / Betalains	Бетацианины / Betacyanins	Бетаксантины / Betaxanthins
3894	‘Генеральская’	1158,62 ± 204,25	939,36 ± 180,39	222,26 ± 36,16
	CV, %	17,63	19,27	16,27
3982	‘Маруся’	838,28 ± 132,13	668,53 ± 100,65	169,75 ± 36,10
	CV, %	15,76	15,06	21,27
4014	‘Герман’	816,42 ± 251,54	644,73 ± 213,89	171,69 ± 39,29
	CV, %	30,81	33,17	22,88
4023	‘Мечта Кулинара’	933,76 ± 252,	743,92 ± 186,02	189,84 ± 67,50
	CV, %	27,03	25,01	35,55
4032	‘Комбат’	793,31 ± 144,26	632,22 ± 111,65	161,09 ± 34,09
	CV, %	18,18	17,66	21,16
4033	‘Санькина Любовь’	1024,26 ± 262,76	832,64 ± 208,29	191,62 ± 57,54
	CV, %	25,65	25,01	30,03
	Mean ± SD	670,69 ± 189,98	529,43 ± 156,29	141,26 ± 35,42
	$НСР_{05}$ / LSD_{05}	133,90	116,25	26,06

Примечание: Mean – среднее по группе; SD – стандартное отклонение; CV – коэффициент вариации, $НСР_{05}$ – наименьшая существенная разница

Note: Mean – group mean; SD – standard deviation; CV – coefficient of variation; LSD_{05} – least significant difference

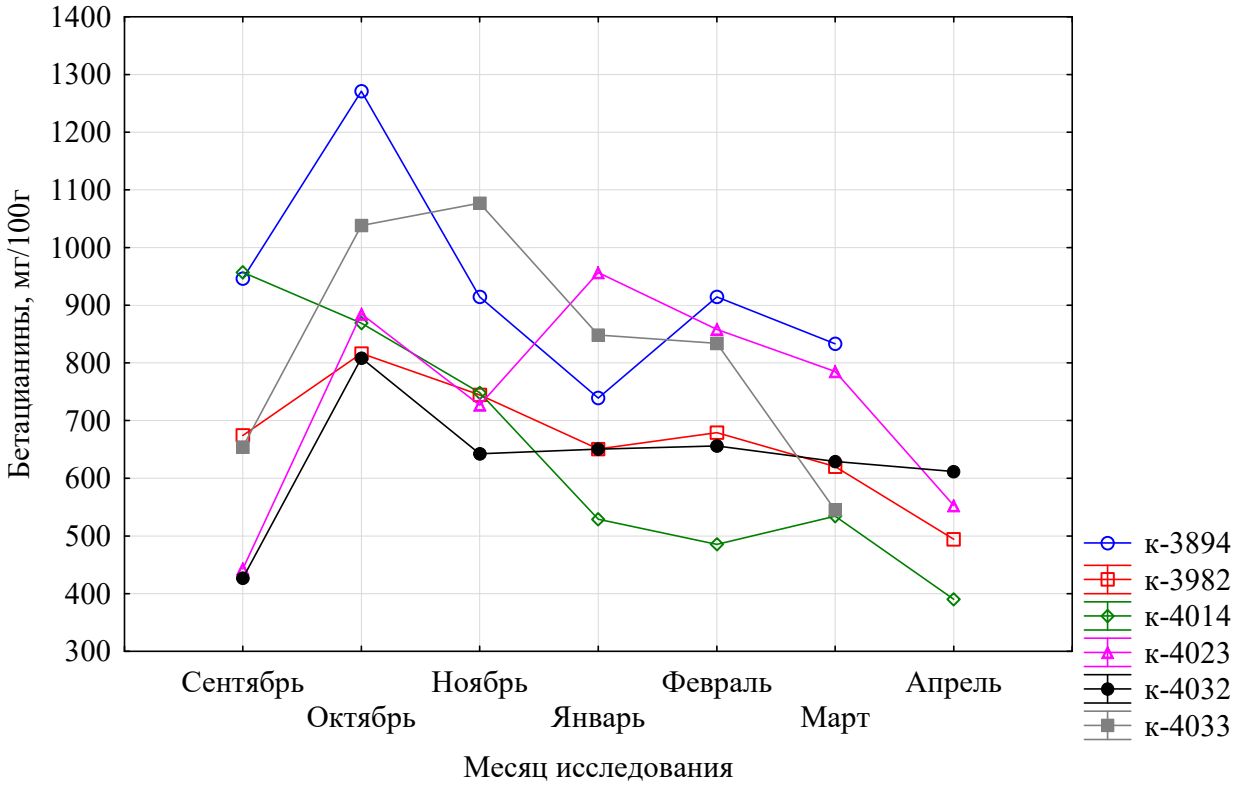


Рис. 5. Динамика изменения содержания бетацианинов у образцов с высоким содержанием беталаинов

Fig. 5. Dynamics of betacyanin content variation in accessions with high betalain content

который изначально не выделялся по содержанию пигментов среди образцов описываемой группы, но в процессе хранения продемонстрировал их значительное накопление, достигнув максимума (1076,88 мг/100 г) через три месяца после уборки урожая. Самые стабильные значения бетацианинов отмечены у образца 'Комбат', у которого начиная с ноября и до конца периода хранения содержание пигмента практически не изменялось. Полученные данные свидетельствуют о преобладании значения конкретного генотипа при выборе сорта для выделения бетанина.

Заключение

Впервые проведен ежемесячный мониторинг динамики изменения содержания беталаинов в корнеплодах столовой свеклы в течение длительного хранения. Выявлено снижение содержание пигмента в среднем на 28%, что связано с особенностью обменных процессов у корнеплодов в конкретных условиях хранения и генотипом. Наименьшие потери бетацианинов в процессе хранения были отмечены в корнеплодах образцов столовой свеклы с низким количеством красящего пигмента.

В результате проведенных исследований выявлено, что накопление бетацианинов и бетаксантинов в корнеплодах столовой свеклы резко возрастало в первый месяц хранения. Показатели увеличивались до 40% от первоначального значения, что необходимо учитывать при выборе оптимальных сроков использования сырья при производстве красителя. Полученные данные могут представлять интерес для последующих исследований, направленных на изучение факторов, влияющих на динамические изменения содержания пигментов в корнеплодах свеклы столовой в течение длительного хранения.

Наиболее перспективным сортом для производства красящего пигмента оказался сорт 'Генеральская' (к-3894, Россия), который обладал максимальным количеством бетацианинов на момент уборки и в первый месяц хранения корнеплодов. Сорта 'Комбат' (к-4032, Россия) и 'Маруся' (к-3982, Россия) обладали наиболее стабильным содержанием пигмента. Данные образцы рекомендуются для выделения красителя в течении всего периода длительного хранения.

Полученные данные важны для производителей натурального пищевого красителя бетанина и для селекционной работы на повышенное содержание беталаинов у столовой свеклы.

References / Литература

Burenin V.I. Genetic resources of the genus *Beta* L. (Beet) (Geneticheskiye resursy roda *Beta* L. [Svekla]). St. Petersburg: VIR; 2007. [in Russian] (Буренин В.И. Генетические ресурсы рода *Beta* L. (Свекла). Санкт-Петербург: ВИР; 2007).

Casique-Arroyo G., Martinez-Gallardo N., González de la Vara L., Délano-Frier J.P. Betacyanin biosynthetic genes and enzymes are differentially induced by (a)biotic stress in *Amaranthus hypochondriacus*. *PLoS One*. 2014;9(6):e99012. DOI: 10.1371/journal.pone.0099012

Chesnokova N.Yu., Kuznetsova A.A., Levochkina L.V., Tarabaev M.A. Properties and application of betalaine dye isolated from regional beet variety. *Agrarian Science*. 2023;374(9):185-190. [in Russian] (Чеснокова Н.Ю., Кузнецова А.А., Левочкина Л.В., Тарабаев М.А. Свойства и применение беталаинового красителя, выделенного из районированного сорта столовой свеклы. *Аграрная наука*. 2023;374(9):185-190). DOI: 10.32634/0869-8155-2023-374-9-185-190

Das M., Saeid A., Hossain M.F., Jiang G.H., Eun J.B., Ahmed M. Influence of extraction parameters and stability of betacyanins extracted from red amaranth during storage. *Journal of Food Science and Technology*. 2018;56(2):643-653. DOI: 10.1007/s13197-018-3519-x

Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*. 2001;4(1):1-9. http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm

Hayakawa K., Agarie S. Physiological roles of betacyanin in a halophyte, *Suaeda japonica* Makino. *Plant Production Science*. 2010;13(4):351-359. DOI: 10.1626/pps.13.351

Herbach K.M., Stintzing F.C., Carle R. Betalain stability and degradation – structural and chromatic aspects. *Journal of Food Science*. 2006;71(4):R41-R50. DOI: 10.1111/j.1750-3841.2006.00022.x

Herbach K.M., Stintzing F.C., Carle R. Impact of thermal treatment on color and pigment pattern of red beet (*Beta vulgaris* L.) preparations. *Journal of Food Science*. 2004;69(6):491-498. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2004.tb10994.x

Khan M.I., Giridhar P. Plant betalains: Chemistry and biochemistry. *Phytochemistry*. 2015;117:267-295. DOI: 10.1016/j.phytochem.2015.06.008

Koldaev V.M. Dynamics of changes in the content of betalain pigments in red beet roots during the growing season and storage. *Vegetable Crops of Russia*. 2023;(3):10-15. [in Russian] (Колдаев В.М. Динамика изменения содержания беталаиновых пигментов в корнеплодах красной свеклы в процессе вегетации и хранения. *Овощи России*. 2023;(3):10-15). DOI: 10.18619/2072-9146-2023-3-10-15

Kopytko Ya.F., Tolkachev O.N. Location in nature, cell cultures, application and pharmacological action of betalains and their derivatives. *Traditional Medicine*. 2020;2(61):52-59. [in Russian] (Копытько Я.Ф., Толкачев О.Н. Нахождение в природе, клеточные культуры, применение и фармакологическое действие беталаинов и их производных. *Традиционная медицина*. 2020;2(61):52-59).

Lin X., Li B., Wen J., Wu J., Tang D., Yu Y. et al. Storage stability and in vitro bioaccessibility of liposomal betacyanins from Red Pitaya (*Hylocereus polyrhizus*). *Molecules*. 2022;27(4):1193. DOI: 10.3390/molecules27041193

Litvinov S.S. Scientific foundations of modern vegetable growing (Nauchnye osnovy sovremennogo ovoshchevodstva). Moscow: VNIIO; 2008. [in Russian] (Литвинов С.С. Научные основы современного овощеводства. Москва: ВНИИО; 2008).

Minzanova S.T., Mironov V.F., Tsepaeva O.V., Vyshtakaluk A.B., Mindubaev A.Z., Mironova L.G. et al. Phytogenous betalaine pigments: isolation, structure and chemical properties. *Butlerov Communications*. 2010;19(2):1-11. [in Russian] (Минзанова С.Т., Миронов В.Ф., Цепаева О.В., Выштакалюк А.Б., Миндубаев А.З., Миронова Л.Г. и др. Беталаиновые пигменты растительного происхождения: выделение, структура и химические свойства. *Бутлеровские сообщения*. 2010;19(2):1-11).

Miyagawa Y., Fujita H., Adachi S. Kinetic analysis of thermal degradation of betanin at various pH values using deconvolution method. *Food Chemistry*. 2021;361:130165. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.130165

Paunovic D., Stojanovic B., Dimitrijevic D., Kristic J., Kostic D. Betalains – natural pigments for healthy food. *Chemia Naissensis*. 2020;3(1):32-49. DOI: 10.46793/ChemN3.1.032P

Saenko I.I., Tarasenko D.V., Deineka V.I., Deineka K.A. Betacyanins of red beetroot root. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences*. 2012;3(122):194-200. [in Russian] (Саенко И.И., Тарасенко О.В., Дейнека В.И., Дейнека П.А. Бетацианины корнеплодов красной свеклы. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия Естественные науки*. 2012;3(122):194-200).

Sepúlveda-Jiménez G., Rueda- Benítez P., Porta H., Rocha-Sosa M. Betacyanin synthesis in red beet (*Beta vulgaris*) leaves induced by wounding and bacterial infiltration is preceded by an oxidative burst. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 2004;64(3):125-133. DOI: 10.1016/j.pmpp.2004.08.003

Shachek T.M., Protasenya L.N., Zelenkova E.N. Applications of plant-derived colorant betanin in the coloration of cosmetics. *Food Industry: Science and Technologies*. 2023;16(3):67-78. [in Russian] (Шачек Т.М., Протасеня Л.Н., Зеленкова Е.Н. Применение натурального красителя бетанина в производстве косметической продукции. *Пищевая промышленность: наука и технологии*. 2023;16(3):67-78).

Slimen I.B., Najar T., Abderradda M. Chemical and antioxidant properties of betalains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2017;65(4):675-689. DOI: 10.1021/acs.jafc.6b04208

Sokolova D.V. Dynamic changes in betanin content during the growing season of table beet: their interplay with abiotic factors. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2022;26(1):30-39. [in Russian] (Соколова Д.В. Динамические изменения содержания бетанина в столовой свекле в течение вегетационного периода: их взаимодействие с абиотическими факторами. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2022;26(1):30-39). DOI: 10.18699/VJGB-22-05

Sokolova D.V., Shvachko N.A., Mikhailova A.S., Popov V.S. Betalain content and morphological characteristics of table beet accessions: their interplay with abiotic factors. *Agronomy*. 2022;12(5):1033. DOI: 10.3390/agronomy12051033

Strack D., Vogt T., Schliemann W. Recent advances in betalain research. *ChemInform*. 2003;62(3):247-269. DOI: 10.1002/chin.200319225

Timakova L.N., Dolgopolova M.A. Breeding of table beet in All-Russian Scientific Research Institute of Vegetable Growing – branch of Branch of the FSBSI Federal Scientific Vegetable Center: main directions and results. *News of FSVC*. 2020;(2):21-26. [in Russian] (Тимакова Л.Н., Долгополова М.А. Селекция свеклы столовой во ВНИИО – филиале ФГБНУ ФНЦО: основные направления и результаты. *Известия ФНЦО*. 2020;(2):21-26). DOI: 10.18619/2658-4832-2020-2-21-26

Ustinova Yu.V., Shevchenko T.V., Popov A.M., Plotnikov K.B. Properties and application of natural betalain dyes. *Technologies for the Food and Processing Industry of AIC – Healthy Food*. 2021;(4):72-79. [in Russian] (Устинова Ю.В., Шевченко Т.В., Попов А.М., Плотников К.Б. Свойства и применение природных беталаиновых красителей. *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания*. 2021;(4):72-79). DOI: 10.24412/2311-6447-2021-4-72-79

Valeeva D.I., Sattikhodzhaev H., Shvink K.Yu., Gumerov T.Yu., Reshetnik O.A., Utkin A.V. The effect of pH on the concentration of betalain pigments of plant origin (Vliyaniye pH sredy na kontsentratsiyu betalainovykh pigmentov rastitelnogo proiskhozhdeniya). *Nauchnoye obozreniye. Fundamentalnye i prikladnye issledovaniya = Scientific Review. Fundamental and Applied Research*. 2019;(2):ID55. [in Russian] (Валеева Д.И., Саттиходжаев Х., Швинк К.Ю., Гумеров Т.Ю., Решетник О.А., Уткин А.В. Влияние pH среды

на концентрацию беталаиновых пигментов растительного происхождения. *Научное обозрение. Фундаментальные и прикладные исследования*. 2019;(2):ID55). URL: https://scientificreview.ru/ru/article/view?id=55 [дата обращения: 29.03.2025].

Vogt T., Ibdah M., Schmidt J., Wray V., Nimtz M., Strack D. Light-induced betacyanin and flavonol accumulation in bladder cells of *Mesembryanthemum crystallinum*. *Phytochemistry*. 1999;52(4):583-592. DOI: 10.1016/s0031-9422(99)00151-x

Wang C.Q., Zhao J.Q., Chen M., Wang B.S. Identification of betacyanin and effects of environmental factors on its accumulation in halophyte *Suaeda salsa*. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*. 2006;32(2):195-201.

Yang W., Kaimainen M., Järvenpää E., Sandell M., Huopalahti R., Yang B. et al. Red beet (*Beta vulgaris*) betalains and grape (*Vitis vinifera*) anthocyanins as colorants in white currant juice – Effect of storage on degradation kinetics, color stability and sensory properties. *Food Chemistry*. 2021;348:128995. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.128995

Информация об авторах

Александр Михайлович Зарецкий, аспирант, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, 744121296@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-3141-4379

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

Information about the authors

Alexander M. Zaretsky, Postgraduate Student, Associate Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, 744121296@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-3141-4379

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

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 12.09.2025; одобрена после рецензирования 25.12.2025; принята к публикации 02.04.2026.
The article was submitted on 12.09.2025; approved after reviewing on 25.12.2025; accepted for publication on 02.04.2026.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 636.086.15:631.527:664.6/.7
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o11

CC BY

Технологическая оценка качества муки диплоидных и тетраплоидных образцов кукурузы

И. А. Кибкало, Э. Б. Хатефов

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. Согласно отчету Обсерватории экономической сложности (ОЭС) за 2023 г., мировой рынок кукурузной муки за последние пять лет растет с каждым годом на 5,85%. Положительная динамика обусловлена возросшей популярностью безглютеновых продуктов и инновационными достижениями в технологиях выращивания и переработки кукурузы.
Материалы и методы. Объектом исследования послужили 10 образцов кукурузы шести подвидов с диплоидным и тетраплоидным геномом из коллекции ВИР. Для изучения влияния кукурузного компонента на технологические свойства пшеничной муки при совместной переработке зерна кукурузы и пшеницы были подобраны образцы мягкой пшеницы как среднего, так и низкого качества. Технологические свойства белкового комплекса зерна кукурузы оценивали методом седиментационного анализа. Состояние углеводного комплекса определяли по числу падения на микро-виско-амилографе фирмы Brabender. Биохимический состав зерна кукурузы определяли на ближнем инфракрасном анализаторе (БИК-анализаторе) SupNIR-2750 (Китай). Статистическая обработка данных выполнена с использованием программного обеспечения Statistica 10.0 от StatSoft Russia.
Результаты. Установлены различия между образцами разных подвидов кукурузы по гранулометрическому составу, потенциалу набухания частиц муки, термодинамике крахмала, степени и характеру воздействия на пшеничный компонент при совместной переработке на уровне реологии клейковины, теста и клейстера, а также хлебной выпечки. Показано укрепление белкового комплекса и подавление ферментативных процессов. Выявлена улучшающая способность образцов восковидной кукурузы при совместной переработке с пшеницей на качество теста, дана оценка образцам мукомольного, крупяного и кормового направления. Наиболее инертны при совместной переработке с пшеницей образцы сахарной кукурузы.
Заключение. Выявленные различия у изученных образцов по технологическим свойствам и внутри технологических групп позволяют вести селекционный отбор по этим признакам.

Ключевые слова: кукурузная мука, пшеничная мука, хлеб, технологическая оценка, диплоид, тетраплоид, зеин, глютен

Благодарности: работа выполнена в рамках реализации государственного задания 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: Кибкало И.А., Хатефов Э.Б. Технологическая оценка качества муки диплоидных и тетраплоидных образцов кукурузы. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(2):69-82. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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.

© Кибкало И.А., Хатефов Э.Б., 2026

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o11

Technological assessment of the quality of flour from diploid and tetraploid maize accessions

Ilya A. Kibkalo, Eduard B. Khatefov

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

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

Background. According to the 2023 report of the Observatory of Economic Complexity (OEC), the global maize flour market has been growing by 5.85% annually over the past five years. This positive trend is driven by the increased popularity of gluten-free products and innovative advances in maize cultivation and processing technologies.
Materials and methods. Ten accessions of six maize subspecies with diploid and tetraploid genomes from the VIR collection were analyzed. Bread wheat accessions with medium and poor flour quality were selected to assess the effect of the maize component on the technological properties of composite flour. Sedimentation analysis was used to evaluate technological properties of the grain protein complex in maize. The carbohydrate complex was determined by the falling number using a Brabender Micro Visco-Amylo-Graph. Biochemical composition of maize grain was quantified with a SupNIR-2750 analyzer (China). Statistical data processing was performed using Statistica 10.0 software from StatSoft Russia (2023).
Results. The studied maize subspecies manifested differences in particle size distribution, swelling potential of flour particles, starch thermodynamics, the degree and nature of the impact on the wheat component during combined processing at the level of the rheology of gluten, dough and paste, as well as bread baking. Strengthening of the protein complex and suppression of enzymatic processes were shown. Waxy maize was found to have an improving effect on the composite wheat-maize dough. Promising accessions were also identified for flour, cereal and feed uses. Sweet maize accessions were the most inert during combined processing with wheat grain.
Conclusion. The differences in technological properties, revealed among the tested accessions and within technological groups, make it possible to perform selection breeding for these properties.

***Keywords*:** maize flour, wheat flour, bread, technological assessment, diploid, tetraploid, zein, gluten

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the state task, Project No. FGEM-2022-0009 “Structuring and disclosing the potential of hereditary variation in the global collection of cereal and groat crops at VIR for the development of an optimized genebank and its sustainable utilization in plant breeding and crop production”.

For citation: Kibkalo I.A., Khatefov E.B. Technological assessment of the quality of flour from diploid and tetraploid maize accessions. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(2):69-82. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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

Мировой рынок кукурузной муки демонстрирует тенденцию к устойчивому росту на следующее десятилетие, что обусловлено ростом популярности безглютеновых продуктов, универсальностью кукурузной муки в различных кухнях мира и инновационными достижениями в технологиях выращивания кукурузы и переработки кукурузной муки. Сектор переработки охватывает различные типы кукурузной муки, включая цельнозерновую, дезагрегированную и маса-муку, а также инновационные продукты, создаваемые на ее основе. Согласно отчету Future Market Insights (FMI), мировой спрос на кукурузную муку будет расти на 6,3% с 2023 по 2033 г., достигнув в общей сложности 34,52 млрд долларов США в 2033 г.

Различные хлебобулочные изделия, потребляемые во всем мире, требуют пшеничной муки с определенными вязкоупругими характеристиками, которые не всегда доступны на рынке. Чтобы удовлетворить эти требования, мукомольные и хлебопекарные предприятия используют различные ингредиенты и технологические добавки. Улучшающие агенты воздействуют на клейковинную сеть и другие компоненты муки, адаптируя их для производства продуктов с желаемыми технологическими и сенсорными свойствами. Многие исследования связывают увеличение параметров, полученных при фаринографическом, экстенсографическом, альвеографическом и других анализах качества, с эффектом усиления муки различными ингредиентами и технологическими добавками (Ferreira et al., 2025). Достойное место среди улучшающих агентов занимает кукурузная мука, которую часто добавляют в продукты питания благодаря высокой пищевой ценности и благотворному влиянию на здоровье человека (Guadarrama-Lezama et al., 2016).

Кукурузная мука состоит из эндосперма: от 75 до 87% крахмала и 6–8% белка (Arendt, Dal Bello, 2008). Зеин – запасной белок эндосперма кукурузы – составляет около 70% от общего количества белка зерновки, относится к спирторастворимым запасным белкам; накапливается в так называемых белковых телах (Holding, Larkins, 2009; Wu, Messing, 2014). Он характеризуется высоким содержанием глутамина, лейцина и пролина, но практически лишен лизина и триптофана. Молотое зерно кукурузы используется для получения таких продуктов, как кукурузная мука и крахмал, masa farina (мука для приготовления масы). Технологические и питательные свойства кукурузы зависят от таких характеристик зерна, как твердость, размер, форма, соотношения амилозы и амилопектина, содержание белка, липидов, которые во многом зависят от подвида, сорта, метода помола, технологии обработки зерна (Caballero-Rothar et al., 2022; An et al., 2023).

Поскольку кукуруза считается безглютеновым злаком, ее можно использовать в производстве безглютеновых продуктов питания, например хлеба. В качестве связующих веществ для замены глютена в рецептуре хлеба используются ксантан, камеди гуарового и рожкового дерева, трагакант. Использование вышеуказанных составляющих приводит к увеличению объема буханки и разрыхлению структуры мякиша. Кукурузная мука, будучи безглютеновой, в составе смеси снижает общее содержание глютена, что приводит к более мягкой текстуре теста и выпечки, в том числе кондитерских изделий. Кукурузная мука может увеличивать водопоглощение, повышать термическую стабильность и замедлять созревание теста (песочного, пряничного, для печенья). Количество добавляемой кукурузной муки оказывает влияние на характеристики и качество обработки смесового теста (De Alcântara et al., 2020; Gu et al., 2023), а также физико-химические свойства композитной муки (Vásquez et al., 2016). Исследования О. П. Храпко и др. (Khrapko et al., 2022) показали влияние высоколизиновой кукурузной муки на физико-химические показатели и органолептические свойства готовой продукции. Результатом их работы стало создание рецептуры хлеба «Солнечный» с добавлением 10% высоколизиновой кукурузной муки.

Цель нашей работы – выявление потенциала коллекционных образцов различных подвидов кукурузы для производства хлебопекарной продукции.

Материалы и методы

В качестве материала для исследований использовали 10 образцов зубовидного, полузубовидного, кремнистого, лопающегося, восковидного и сахарного подвидов кукурузы из коллекции ВИР (Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова), которые были представлены шестью образцами диплоидной и четырьмя образцами тетраплоидной кукурузы пищевого назначения (табл. 1). Хлебопекарные свойства образцов ранее не изучались, зерновки отличались между собой консистенцией, химическим составом и типом эндосперма. Результаты текущего исследования имеют предварительный характер.

Размножение семян опытных образцов проводили под пергаментными изоляторами для сохранения типичности и однородности, в условиях степной зоны Кабардино-Балкарской Республики (г. Прохладный, 43°45’00” с. ш., 44°02’00” в. д.) в 2023 г. Почвенный покров участка представлен среднемощным тяжелосуглинистым черноземом, содержащим карбонаты, и характеризуется низким содержанием гумуса (до 3%). Содержание азота в почве составляет 13,2 мг/кг, что соответствует средним показателям. Содержание подвижного фосфора и обменного калия, определенного по методу Мачигина, является повышенным (33 мг/кг) и средним (220 мг/кг) соответственно. Кислотность почвы близка к нейтральной (7,4). Схема посева опытных образцов: 70 × 35 см, широкорядная, площадь делянки – 4,9 м^2. Агротехника соответствовала методическими рекомендациям (Sotchenko, 2009).

Технологические свойства белкового комплекса зерна кукурузы оценивали методом седиментации (Kibkalo, 2022). О состоянии углеводного комплекса судили по числу падения и данным прибора микро-виско-амилографа фирмы Brabender.

Реологические свойства теста смесевых образцов (30% кукурузы и 70% пшеницы) оценивали на фариографе фирмы Brabender. В ходе исследований производили отмывку сырой клейковины с контролем ее качества на приборе ИДК-3М. Для этого анализа к 25 г цельнозерновой пшеничной муки добавляли 5 г размолотого кукурузного зерна. Была произведена лабораторная пробная выпечка как формового, так и подового хлеба из смесевых образцов с использованием сортовой пшеничной муки лабораторного помола (70-процентный выход). В первом случае использовали пшеничную муку среднего качества, согласно предварительно проведенному анализу качества клейковины и числу падения (ЧП), во втором – низкого качества (со слабой клейковиной и низким числом падения). Смесевые образцы при этом

Таблица 1. Образцы коллекции кукурузы ВИР, использованные в опыте
Table 1. Maize accessions from the VIR collection used in the experiment

№ по каталогу ВИР	Наименование образца	*Zea mays* L. subspecies	Плоидность	Цвет зерна
Образцы мукомольного назначения				
23994	'Кабардинская Белая Зубовидная'	*indentata* Sturt.	2n	белое
25204	'Белозерная Тетраплоидная'	*semidentata* Kulesch.	4n	белое
Образцы крупяного назначения и для производства попкорна				
23995	'Местная Белая Кремнистая'	*indurata* Sturt.	2n	белое
25199	Попкорн	*everta* Sturt.	2n	желтое
Образцы кормового назначения				
23400	'Кабардинская 3812'	*semidentata* Kulesch.	2n	желтое
23427	'Тетра-1'	*semidentata* Kulesch.	4n	желтое
Образцы сахарной кукурузы пищевого назначения для употребления в свежем и консервированном виде				
23993	'Ранняя Лакомка'	*saccharata* (Sturt.) Zhuk.	2n	желтое
23426	'Баксанская Сахарная'	*saccharata* (Sturt.) Zhuk.	4n	желтое
Образцы, предназначенные для получения амилопектинового крахмала				
23388	'Восковидная Диплоидная'	*ceratina* Kulesch.	2n	желтое
25205	'Восковидная Тетраплоидная'	*ceratina* Kulesch.	4n	желтое

формировались также в соотношении 30% к 70%. Для оценки взаимного влияния углеводно-амилазного комплекса зерна кукурузы и пшеницы проводили оценку числа падения в двух смесевых вариантах: к 7 г размолотого кукурузного зерна добавляли 1 г амилазно-активного пшеничного материала (пророщенная пшеница, высушенная и смолотая), а также к 5 г цельнозерновой муки среднего качества (с числом падения 159 с) добавляли 2 г кукурузной муки. В качестве пшеничного компонента среднего качества для фариографического исследования, определения числа падения, показателя ИДК и формовой выпечки использовалось зерно сорта мягкой пшеницы 'Памяти Суслякова' (к-67338). В опыте с подовой выпечкой использовалось зерно сорта мягкой пшеницы 'Акмолинка 1' (к-38515) низкого качества.

Для оценки физических свойств эндосперма кукурузного зерна провели ситовой анализ продуктов его размола с использованием сит с проходными отверстиями 0,3; 0,25; 0,16 и 0,106 мм. Размол кукурузного зерна проводили на лабораторной мельнице циклонного типа ЛМЦ-5, пшеницы – на мельнице LM 3100 (Perten). Твердость хлебного мякиша определяли на структурометре СТ-2. Сортовую муку получали на лабораторной мельнице Quadrumat Junior фирмы Brabender (Германия). Биохимический состав зерна кукурузы определяли на БИК-анализаторе SupNIR-2750 (Китай). Статистическая обработка данных: M – среднее арифметическое; Me – медиана (середина ряда); σ (сигма) – стандартное (среднеквадратическое) отклонение; C_v, % – коэффициент вариации (мера относительного разброса); m – стандартная ошибка среднего – проведена с использованием программного обеспечения Statistica 10.0 от StatSoft Russia (https://1soft.space/en/statsoft-statistica).

Результаты и обсуждение

Анализ результатов размола зерна: распределение на фракции по размеру частиц может зависеть от консистенции эндосперма и твердозерности, на которые оказывают влияние «плотность упаковки» белковых макромолекул, размер и структурность крахмальных зерен. В нашем опыте отмечены заметные различия между образцами по представленности фракций гранулометрического состава (табл. 2).

Кроме этого, выявлены и различия между хозяйственными группами образцов кукурузы (см. табл. 1). Практически все образцы имели наибольшие или значительные фракции на ситах 0,16 и 0,106 мм. Наибольшие различия обнаружены по представленности самой крупной (0,3 мм) и самой мелкой (менее 0,106 мм) фракций. Максимальные значения самой крупной фракции размола зерна имели кормовые образцы (22,5–33,2%), а также образцы сахарной кукурузы (19,5–22,9%), которые можно признать наиболее твердозерными. Далее расположились образцы крупяного назначения и для производства попкорна (19,9–19,0 %). Наиболее мучнистыми (максимальные значения самой мелкой фракции) оказались образцы мукомольного назначения (22,0–18,4%) и образцы для получения амилопектинового крахмала (далее в тексте: «для получения крахмала») (21,7–18,0%).

Технологический потенциал зерновых культур можно определить по способности частиц размола к устойчивому набуханию, которое лежит в основе многих циклов переработки зерна (Kibkalo, 2022). На величину седиментационного осадка значительно влияют свойства запасных белков зерна. Двухступенчатый седиментационный анализ, примененный нами, позволяет оценить

Таблица 2. Фракции гранулометрического состава продуктов размола зерна кукурузы, %
Table 2. Particle size distribution fractions in maize grain milling products, %

Образец	Размер проходных отверстий сит, мм				
	0,3	0,25	0,16	0,106	< 0,106 мм
'Кабардинская Белая Зубовидная'	13,1	10,0	25,9	29,0	22,0
'Белозерная Тетраплоидная'	14,5	11,3	29,4	26,4	18,4
'Местная Белая Кремнистая'	19,0	9,7	26,8	27,7	16,8
'Баксанская Сахарная'	19,5	9,2	32,0	29,5	9,8
'Ранняя Лакомка'	22,9	3,4	23,8	39,9	10,0
'Восковидная Тетраплоидная'	16,8	5,1	39,2	17,2	21,7
'Восковидная Диплоидная'	9,7	5,5	29,3	37,5	18,0
'Кабардинская 3812'	22,5	8,8	24,6	32,8	11,3
'Тетра-1'	33,2	7,2	39,5	13,9	6,2
Попкорн	19,5	10,0	28,7	27,0	14,8
M ± m	19,07 ± 2,15	8,02 ± 0,86	29,92 ± 1,85	28,09 ± 2,67	14,90 ± 1,79
Me	19,25	9,0	29,0	28,35	15,8
σ	6,46	2,59	5,54	8,01	5,38
C_v, %	33,89	32,30	18,50	28,51	36,13

способность к набуханию частиц при разных уровнях физико-химической нагрузки и оценить устойчивость к ним. Анализируемые образцы, как правило, разделяются на три группы: первая быстро раскрывает свой потенциал и испытывает деструкцию частиц размола при продлении или увеличении физико-химической нагрузки, вторая способна сохранять устойчивость достигнутого раскрытия потенциала, третья – для раскрытия потенциала необходимо увеличение физико-химической нагрузки (Kibkalo et al., 2024). В нашем опыте все образцы можно было отнести к третьей группе (табл. 3). Отношение Ф2/Ф1 было значительно больше единицы.

Наибольшим потенциалом набухания по сумме осадков двух фаз анализа обладали образцы кормового назначения (115–116 мл) и образцы, предназначенные для получения крахмала (125–110 мл). И если в первом случае, по аналогии с зерном пшеницы, высокая способность к набуханию соотносится с твердозерностью зерна, то во втором напрашивается вывод об участии специфической структуры крахмала образцов в обеспечении устойчивости объема седиментационного осадка, что является уникальным свойством. Следует отметить, что данные образцы не имели сильных отличий от других по биохимическому составу. Исключение составило лишь более низкое содержание масла (табл. 4). Возможно отчасти, что снижение гидрофобности продуктов размола могло способствовать лучшему их набуханию. Наименьший потенциал набухания показали образцы сахарной кукурузы, обладающие повышенной масличностью.

В силу распространенности совместной переработки зерна пшеницы и кукурузы для создания функциональных продуктов питания большой интерес представляло изучение влияния характеристик зерна этих культур на качество смесового продукта. Результаты отмывки клейковины (табл. 5) показали общую тенденцию к уменьшению содержания сырой клейковины в смесевых образцах по сравнению с контролем (пшеница) за счет снижения ее оводненности. Содержание сухой клейковины у нескольких образцов из разных хозяйственных групп сохранялось на уровне контроля. Однако у некоторых образцов наблюдалось уменьшение и сухого вещества. У образца 'Кабардинская Белая Зубовидная' при тенденции к уменьшению не только сырой клейковины, но и сухого вещества гидратация клейковины сохранялась на уровне контроля.

Полученные данные свидетельствуют о том, что кукурузный материал в данном опыте не имел очевидной интеграции с пшеничной клейковиной; вместе с тем было выявлено существенное изменение физических свойств клейковины из смесевых образцов по отношению к контролю в сторону укрепления. Существенно снизился показатель упруго-вязких свойств по ИДК, сократились растяжимость и расплываемость сырой клейковины (см. табл. 5). Причем образцы значительно различались между собой по степени зарегистрированных изменений. Максимальный эффект укрепления клейковины наблюдался у смесевых образцов с добавлением сахарной кукурузы. Наиболее близкой по физическим свойствам к исходному образцу пшеницы оставалась клейковина, отмытая из смеси с включением образцов 'Кабардинская Белая Зубовидная' и Попкорн. Судя по всему, укрепление пшеничной клейковины происходило за счет вымывания из смесевых образцов ее наиболее «слабых» гидратированных фракций. Тем не менее расплываемость клейковины смесевых образцов оказалась существенно связана (r = 0,83*) с критерием устойчивости белкового комплекса кукурузы к физико-химическим нагрузкам (Ф2/Ф1), что может говорить о частичной замене отдельных фракций пшеничной клейковины белковым комплексом кукурузы.

Таблица 3. **Величина седиментационного осадка, мл**
Table 3. **Sedimentation volume values, mL**

Образец	1-я фаза (Ф1)	2-я фаза (Ф2)	Ф2/Ф1	Общий потенциал набухания (Ф1+Ф2)
‘Кабардинская Белая Зубовидная’	38	60	1,58	98
‘Белозерная Тетраплоидная’	38	56	1,47	94
‘Местная Белая Кремнистая’	40	59	1,48	99
‘Баксанская Сахарная’	35	46	1,31	81
‘Ранняя Лакомка’	28	41	1,46	69
‘Восковидная Тетраплоидная’	50	75	1,50	125
‘Восковидная Диплоидная’	42	68	1,62	110
‘Кабардинская 3812’	42	73	1,74	115
‘Тетра-1’	44	72	1,64	116
Попкорн	36	54	1,50	90
M ± m	39,30 ± 1,96	60,40 ± 3,87	1,53 ± 0,04	99,70 ± 5,74
Me	39	59,5	1,5	98,5
σ	5,89	11,60	0,12	17,22
C_v, %	14,98	19,2	7,8	17,3

Таблица 4. **Биохимический состав зерна кукурузы**
Table 4. **Biochemical composition of maize grain**

Образец	Масло	Клетчатка	Белок	Крахмал
‘Кабардинская Белая Зубовидная’	4,17	3,17	11,51	69,29
‘Белозерная Тетраплоидная’	3,91	3,0	12,61	68,44
‘Местная Белая Кремнистая’	3,93	2,81	10,66	70,11
‘Баксанская Сахарная’	4,56	2,37	11,97	69,87
‘Ранняя Лакомка’	5,34	2,53	11,95	70,36
‘Восковидная Тетраплоидная’	2,84	2,7	13,29	67,94
‘Восковидная Диплоидная’	2,8	3,03	10,99	70,75
‘Кабардинская 3812’	3,94	2,88	12,51	68,74
‘Тетра-1’	3,73	3,36	12,33	67,95
Попкорн	4,22	3,56	14,05	65,59
M ± m	3,94 ± 0,25	2,94 ± 0,12	12,19 ± 0,34	68,90 ± 0,51
Me	3,935	2,94	12,15	69,015
σ	0,75	0,36	1,02	1,53
C_v, %	18.96	12,40	8,35	2,22

Эффект укрепления белкового каркаса смесевых образцов теста наблюдался и по результатам фаринографирования (табл. 6).

Отмечалось существенное сокращение водопоглотительной способности материала в смесевых образцах по отношению к контролю, увеличивалось время образования теста, стабильность теста, число валориметра, и в большинстве случаев значительно сокращалось разжижение теста. Однако распределение по интенсивности воздействия «кукурузной составляющей» на пшеничный материал оказалось иным, чем при изучении клейковины. Наиболее приближенные к пшеничным физические

Таблица 5. **Физические свойства клейковины из смесевых образцов**
Table 5. **Physical properties of gluten in composite product samples**

Образец	Содержание сырой клейковины*, %	Содержание сухой клейковины*, %	Гидратация клейковины, %	Показатель ИДК, ед. пр.**	Растяжимость клейковины, см	Расплываемость клейковины, мм
‘Кабардинская Белая Зубовидная’	33	11,7	184	80,7	18	73
‘Белозерная Тетраплоидная’	33,2	12,8	160	72,9	20	68
‘Местная Белая Кремнистая’	32,5	12,3	165	71,4	17,5	66
‘Баксанская Сахарная’	29,8	11,5	160	65,5	17,5	62
‘Ранняя Лакомка’	32,2	12,4	160	59,2	15,5	65
‘Восковидная Тетраплоидная’	29,3	11,1	163	70,8	18	67
‘Восковидная Диплоидная’	31,8	11,9	161	71	17,5	67
‘Кабардинская 3812’	34,5	12,6	174	76,2	21,5	73
‘Тетра-1’	33,7	12,6	169	74,3	22	70
Попкорн	32,8	12	174	82,8	21	69
Пшеница	35,8	12,5	186	84,7	26	79
M ± m	32,6 ± 0,59	12,13 ± 0,17	168,73 ± 3,04	73,59 ± 2,36	19,50 ± 0,94	69,00 ± 1,47
Me	32,8	12,3	165	72,9	18	68
σ	11,8	0,53	9,60	7,47	2,96	4,65
C_v, %	5,75	4,40	5,69	10,15	15,17	6,74

Примечание: * – расчет % произведен от 25 г пшеничного материала; ** – единицы прибора
Note: * – the percentage was calculated for 25 g of wheat material; ** – instrument units

Таблица 6. **Реологические свойства теста смесевых образцов**
Table 6. **Rheological properties of the dough from composite product samples**

Образец	Водопоглотительная способность, %	Время образования теста, мин	Стабильность, мин	Разжижение, ед. пр.*	Число валориметра, ед. пр.*
‘Кабардинская Белая Зубовидная’	60	4,03	2,23	28	64
‘Белозерная Тетраплоидная’	59	5,33	6,93	12	68
‘Местная Белая Кремнистая’	59	4,25	8,33	22	66
‘Баксанская Сахарная’	65	4,62	2,03	94	53
‘Ранняя Лакомка’	65	3,82	1,08	141	47
‘Восковидная Тетраплоидная’	61	8,8	13,45	12	76
‘Восковидная Диплоидная’	61	9	13,38	18	78
‘Кабардинская 3812’	61	8,95	10,6	19	78
‘Тетра-1’	60	8,27	9,73	18	76
Попкорн	59	7,4	9,14	17	72
Пшеница	70	3,2	0,87	143	41
M ± m	61,82 ± 1,09	6,15 ± 0,74	7,07 ± 1,51	47,64 ± 16,45	65,36 ± 4,10
Me	61	5,33	8,33	19	68
σ	3,46	2,33	4,79	52,02	12,97
C_v, %	5,60	37,88	67,7	109,2	19,84

Примечание: * – единицы прибора
Note: * – instrument units

свойства теста имели смесевые образцы с добавлением сахарной кукурузы. Максимально укрепляли тесто образцы кукурузы для получения крахмала и кормового назначения, а также образец Попкорн. Объяснить полученные результаты можно тем, что запасные вещества зерновок кукурузы и пшеницы находились в постоянном взаимодействии во время реологических испытаний теста. Данные фаринографирования оказались согласованы с седиментационной оценкой. Так, время образования теста (ВОТ) оказалось достоверно связано с Ф1 (0,71*), Ф2 (0,80*), Ф1+Ф2 (0,79*); стабильность теста – с Ф1 (0,82*), Ф2 (0,83*), Ф1+Ф2 (0,84*); разжижение теста – с Ф1 (–0,77*), Ф2 (–0,78*), Ф1+Ф2 (–0,79*); число валориметра – с Ф1 (0,83*), Ф2 (0,91*); Ф1+Ф2 (0,90*), а также с Ф2/Ф1 (0,71*).

Свойства крахмала, который часто называют углеводно-амилазным комплексом, обычно не зависят от свойств белков, но вместе могут влиять на технологические свойства зерна разных злаковых культур, обуславливая их различие между собой. Для оценки состояния углеводного комплекса у кукурузы различных хозяйственных групп, его влияния на технологические свойства провели анализ продуктов размола зерна на микровиско-амилографе по протоколу испытаний для кукурузного крахмала с увеличенной навеской экспериментального материала (15 г), а также измерили число падения (ЧП). Ранее, при выявлении существенных различий между разными сортами кукурузы (Kibkalo, Zhuk, 2022), была принята следующая схема испытаний. Сначала оценивалось ЧП «чистого» кукурузного материала (7 г), затем с добавлением 1 г пшеницы с высокой амилазной активностью и смесевого образца (5 г пшеницы со средним значением ЧП (159 с) + 2 г кукурузы). Такая модель позволяет изучить вязкость крахмала при образовании клейстера, косвенно определить его атакуемость (способность к гидролизации под воздействием амилаз), а также понять, как он влияет на свойства пшеничного крахмала при их совместной переработке. Результаты опыта представлены в таблице 7.

Образцы кукурузы по ЧП продемонстрировали максимально возможное разнообразие – от 60 до 900 секунд. Наибольшую вязкость клейстера показали образцы ‘Белозерная Тетраплоидная’ и Попкорн. Минимальное ЧП закономерно оказалось у образцов сахарной кукурузы и образцов для получения крахмала, хотя образец ‘Восковидная Диплоидная’ несколько отличался большей вязкостью. Неожиданно в этой же группе оказался образец кормового назначения ‘Кабардинская 3812’, что также говорит о характере структуры его крахмала. При добавлении пшеницы с высокой активностью амилазы в целом наблюдалась тенденция: чем выше изначальное значение ЧП, тем более сильным было разжижение клейстера. Однако образцы с максимальным значением ЧП различались по данному показателю. Образец Попкорн сильнее снижал вязкость клейстера, чем ‘Белозерная Тетраплоидная’, что свидетельствует о более низкой атакуемости крахмала последнего. Образцы кукурузы, изначальное ЧП которых было достаточно высоким, проде-

Таблица 7. Число падения образцов кукурузы и смесевых образцов
Table 7. Falling number of maize accessions and composite product samples

Образец	Число падения, с	Число падения при добавлении амилазно-активной добавки, с	Снижение числа падения, с	Число падения смесевого образца, с
‘Кабардинская Белая Зубовидная’	526	422	104	166
‘Белозерная Тетраплоидная’	900	627	273	177
‘Местная Белая Кремнистая’	472	343	129	165
‘Баксанская Сахарная’	60	60	–	117
‘Ранняя Лакомка’	60	60	–	96
‘Восковидная Тетраплоидная’	60	60	–	82
‘Восковидная Диплоидная’	96	68	28	104
‘Кабардинская 3812’	61	60	1	172
‘Тетра-1’	633	465	168	162
Попкорн	900	361	539	136
Пшеница	159	60	99	–
M ± m	357,00 ± 108,04	235,09 ± 67,09	121,91 ± 51,75	125,18 ± 16,88
Me	159	68	99	136
σ	341,65	212,15	163,66	53,39
C_v, %	95,7	90,24	134,25	42,65

монстрировали заметную устойчивость к действию α-амилазы. Однако ни один из них не продемонстрировал высокую смесительную способность: они лишь незначительно улучшали показатель пшеницы или находились на одном уровне с ним. Образцы с изначальным низким значением ЧП закономерно ухудшали пшеничный показатель. Исключение составил образец 'Кабардинская 3812', что вызывает еще больший интерес к строению его крахмала.

Испытание термодинамических свойств крахмала на виско-амилографе отличается от определения ЧП принципом температурного воздействия. Если в последнем случае крахмальная взвесь сразу помещается в высокотемпературную среду, что вызывает стремительное заваривание клейстера, то при испытании на виско-амилографе температура среды поднимается постепенно. При достижении максимальной температуры (92°C) осуществляется выдержка с дальнейшим принудительным охлаждением до 50°C, что обычно вызывает очередное повышение вязкости клейстера, который в течение анализа подвергается механическому воздействию (перемешивание).

Изученные образцы кукурузы продемонстрировали разнообразную конфигурацию виско-амилограмм (рис. 1). Низкую вязкость клейстера на протяжении всего испытания показали образцы сахарной кукурузы (см. рис. 1, № 3 и № 4), что полностью согласуется с данными ЧП. Образцам с низким ЧП режим нагревания опыта позволил лучше реализовать свой потенциал вязкости.

Образец Попкорн (см. рис. 1, № 10), имеющий максимально возможное ЧП, напротив, показал скромные результаты, уступив по вязкости на всех этапах испытания другим образцам, кроме сахарной кукурузы, показав, что для реализации его потенциала вязкости необходим быстрый нагрев. Уникальную виско-амилограмму продемонстрировал образец 'Восковидная Диплоидная' (см. рис. 1, № 6). Клейстер этого образца образовал два равноценных пика густоты – как при нагревании, так и при охлаждении. Причем пик при нагревании образовался задолго до наступления максимальных температур и характеризовал самую высокую вязкость клейстера в горячем состоянии из всех представленных образцов. Самую же высокую вязкость охлажденного клейстера имели образцы мукомольного назначения, а также кормовой образец 'Тетра-1' (4n) (см. рис. 1, №№ 1, 2, 8).

Если говорить о совместной переработке кукурузы и пшеницы, то наиболее распространенным итоговым продуктом является хлеб. Поэтому технологическая характеристика образцов зерна кукурузы была бы неполной без хлебопекарной оценки, где происходит реализация потенциала всех запасных веществ зерна и в полной степени отражается смесительная способность. В связи с чем провели два опыта с лабораторной пробной микровыпечкой. В первом варианте в качестве тестера использовалась пшеничная мука лабораторного помола (70-процентный выход) среднего качества (филлер), пригодная для хлебопечения без улучшителей – со средними значениями реологических свойств теста, клейковины, ЧП, которая использовалась в качестве контроля в соответствующих испытаниях. Произведена формовая выпечка из 25 г муки в соотношении 70% пшеницы на 30% кукурузы. Результаты представлены в таблице 8 и на рисунке 2.

Смесевые образцы хлеба имели различия как между собой, так и по сравнению с контролем. Общая тенденция заключалась в том, что при добавлении 30% кукурузного материала к пшенице-филлеру значительно снижался объем хлеба, пористость становилась более грубой, мякиш – более твердым и плотным. Однако в большинстве случаев значительно снижалась скорость черствения. Наилучшем образом в данном опыте продемонстрировали себя образцы сахарной кукурузы, показав самый высокий из смесевых образцов объем хлеба, невысокую твердость мякиша как после выпечки, так и через сутки при средней скорости черствения. Вероятно, таким образом сказалась инертность крахмала данных образцов, отмеченная в предыдущих испытаниях, а возможно – и повышенное содержание масла. Хлеб с добавлением образца Попкорн обладал довольно высоким объемом по сравнению с другими вариантами, но значительной твердостью мякиша и скоростью черствения. Самый низкий объем хлеба и очень твердый мякиш оказался у смесевых образцов с включением кукурузы для получения крахмала, а также с мукомольным образцом 'Кабардинская Белая Зубовидная' (2n). В целом образцы, предназначенные для получения крахмала, и образцы мукомольного назначения имели очевидные различия между собой внутри хозяйственных групп. Первые значительно разошлись по скорости черствения. Добавление образца 'Восковидная Тетраплоидная' придавало хлебному мякишу одну из самых высоких скоростей черствения, а 'Восковидная Диплоидная' – одну из самых низких. Возможно, что таким образом сказалась разница в термодинамических характеристиках крахмала этих образцов, отмеченная ранее. В результате хлеб с добавлением образца 'Восковидная Тетраплоидная' оказался самым черствым через сутки после выпечки, а с образцом 'Восковидная Диплоидная', напротив, превзошел по органолептическим свойствам пшеничный хлеб. Образцы мукомольного назначения различались между собой по объему хлеба с их включением; твердость мякиша этого хлеба также различалась: она была самой высокой, а скорость черствения – самой низкой. В результате через сутки после выпечки твердость хлебного мякиша с добавлением образца 'Кабардинская Белая Зубовидная' (2n) была выше, чем у контроля, а с образцом 'Белозерная Тетраплоидная' – ниже и уступала по мягкости только хлебу с включением образцов сахарной кукурузы.

В предварительных испытаниях кукуруза демонстрировала укрепление белкового комплекса пшеницы и определенную устойчивость к ферментативным нагрузкам; интерес представляла хлебопекарная оценка со слабым пшеничным компонентом. Для этого произвели лабораторную пробную микровыпечку подового хлеба из 15 г муки, где в качестве тестера использовалась мука пшеницы, характеризующаяся слабой клейковиной и пониженным ЧП. Соотношение пшеницы и кукурузы оставалось прежним (70% на 30%). Результаты анализа представлены на рисунке 3 и в таблице 9.

Результаты анализа оказались противоположными полученным при изучении формового хлеба (см. выше). Добавление кукурузной муки, как правило, приводило к улучшению формоустойчивости хлеба (h/d), улучшению пористости. Однако твердость мякиша оказалась по-прежнему наименьшей у пшеничного хлеба, причем этот результат сохранялся и через сутки после выпечки. Незначительно уступал по этому показателю пшеничному хлеб с добавлением сахарной кукурузы 'Ранняя Лакомка' (2n). Другой сорт сахарной кукурузы 'Баксанская Сахарная' (4n) придавал хлебу самую низкую скорость черствения, однако по мягкости мякиша через сутки после выпечки этот образец все же уступал двум лучшим

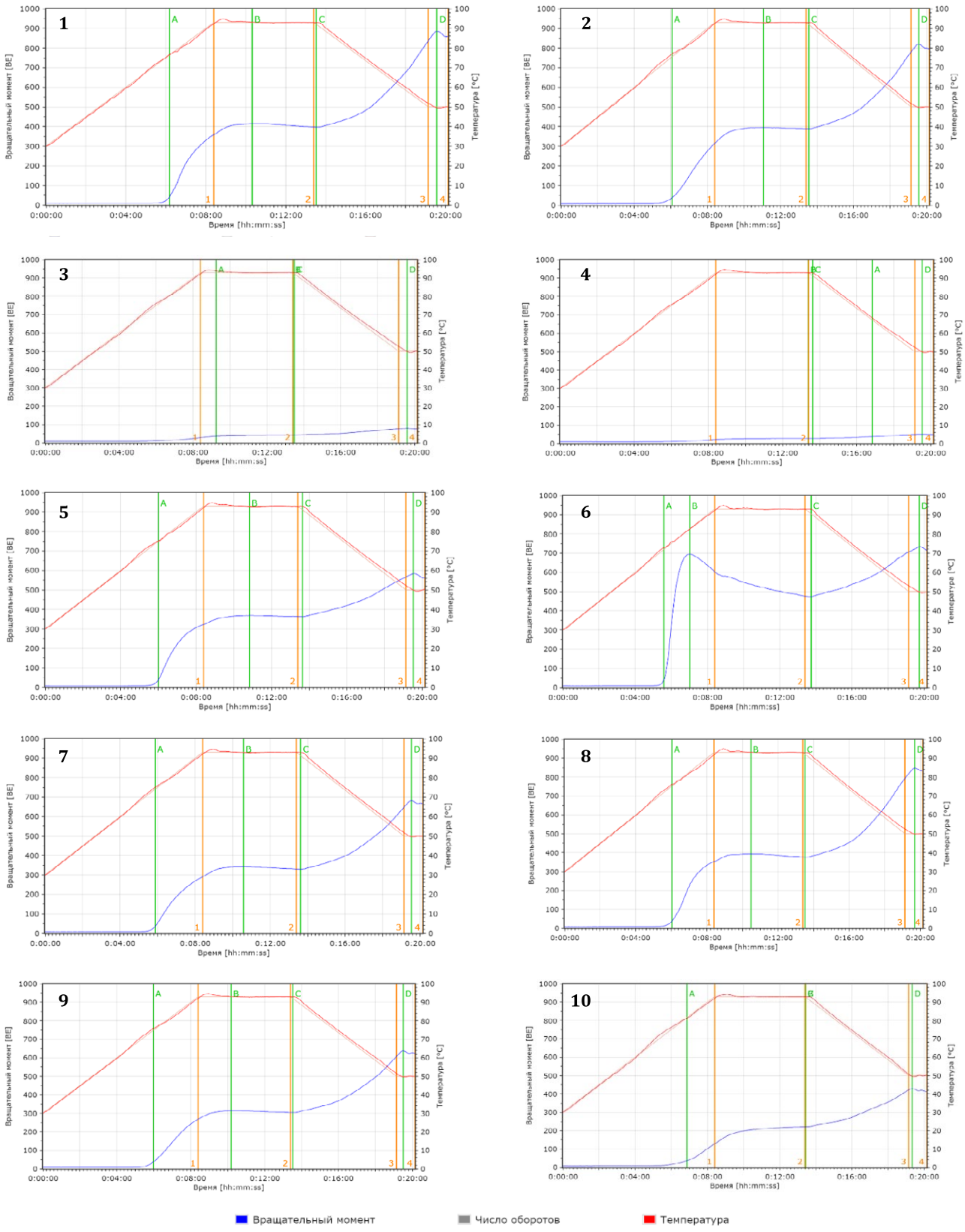


Рис. 1. Термодинамические свойства крахмала в продуктах размола кукурузного зерна по виско-амилограмме: 1 – ‘Кабардинская Белая Зубовидная’ (2n); **2** – ‘Белозерная Тетраплоидная’ (4n); **3** – ‘Баксанская Сахарная’ (4n); **4** – ‘Ранняя Лакомка’ (2n); **5** – ‘Восковидная Тетраплоидная’ (4n); **6** – ‘Восковидная Диплоидная’ (2n); **7** – Кабардинская 3812 (2n); **8** – ‘Тетра-1’ (4n); **9** – ‘Местная Белая Кремнистая’ (2n); **10** – Попкорн

Fig. 1. Thermodynamic properties of starch in maize grain milling products according to the visco-amylogram: 1 – ‘Kabardinskaya Belaya Zubovidnaya’ (2n); **2** – ‘Belozernaya Tetraploidnaya’ (4n); **3** – ‘Baksanskaya Sakharnaya’ (4n); **4** – ‘Rannyaya Lakomka’ (2n); **5** – ‘Voskovidnaya Tetraploidnaya’ (4n); **6** – ‘Voskovidnaya Diploidnaya’ (2n); **7** – ‘Kabardinskaya 3812’ (2n); **8** – ‘Tetra-1’ (4n); **9** – ‘Mestnaya Belaya Kremnistaya’ (2n); **10** – Popcorn

Таблица 8. Результаты лабораторной формовой пробной выпечки пшенично-кукурузного хлеба
Table 8. Results of the laboratory pan-baking test for wheat-maize bread

Образец	Объем хлеба, мл*	Плотность мякиша, г/мл	Твердость мякиша, г нагрузки	Черствение мякиша за сутки, г нагрузки	Твердость мякиша через сутки, г нагрузки
'Кабардинская Белая Зубовидная'	232	0,57	5812	1556	7368
'Белозерная Тетраплоидная'	272	0,48	4116	1707	5823
'Местная Белая Кремнистая'	272	0,5	3565	2795	6360
'Баксанская Сахарная'	292	0,49	2447	2158	4605
'Ранняя Лакомка'	288	0,51	2053	3531	5584
'Восковидная Тетраплоидная'	232	0,52	4066	5720	9786
'Восковидная Диплоидная'	248	0,52	4044	1977	6021
'Кабардинская 3812'	272	0,46	3765	3307	7072
'Тетра-1'	260	0,46	3997	3554	7551
Попкорн	280	0,48	3430	4355	7785
Пшеница	400	0,42	1790	5074	6864
M ± m	277,1 ± 14,4	0,49 ± 0,01	3553,18 ± 357,25	3248,55 ± 436,97	6801,73 ± 434,77
Me	272	0,49	3765	3307	6864
σ	45,54	0,04	1129,74	1381,81	1374,87
C_v,%	16,44	8,2	31,8	42,54	20,21

Примечание: * – перерасчет на 100 г муки
Note: * – recalculated per 100 g of flour

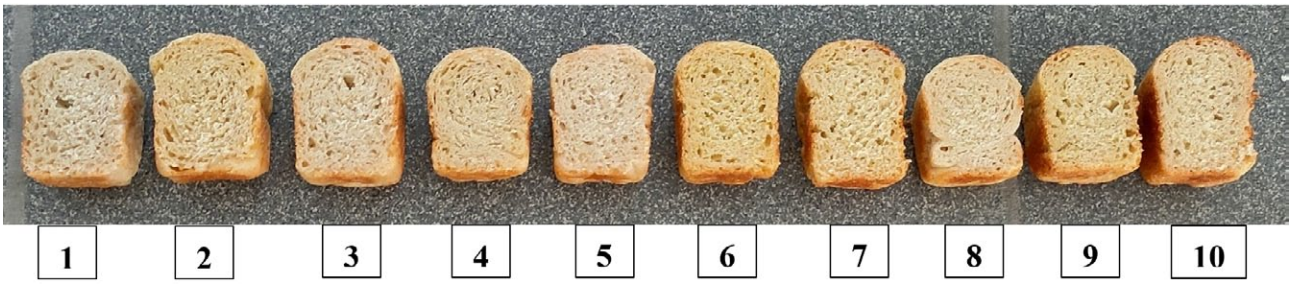


Рис 2. Лабораторная формовая пробная выпечка пшенично-кукурузного хлеба. Использованы кукурузные образцы (слева направо): 1 – 'Кабардинская Белая Зубовидная'; **2** – Попкорн; **3** – 'Белозерная Тетраплоидная'; **4** – 'Восковидная Диплоидная'; **5** – 'Местная Белая Кремнистая'; **6** – 'Кабардинская 3812'; **7** – 'Баксанская Сахарная'; **8** – 'Восковидная Тетраплоидная'; **9** – 'Тетра-1'; **10** – 'Ранняя Лакомка'

Fig. 2. Wheat-maize bread samples obtained in the laboratory pan-baking test. Maize accessions involved (left to right): 1 – 'Kabardinskaya Belaya Zubovidnaya'; **2** – Popcorn; **3** – 'Belozernaya Tetraploidnaya'; **4** – 'Voskovidnaya Diploidnaya'; **5** – 'Mestnaya Belaya Kremnistaya'; **6** – 'Kabardinskaya 3812'; **7** – 'Baksanskaya Sakharnaya'; **8** – 'Voskovidnaya Tetraploidnaya'; **9** – 'Tetra-1'; **10** – 'Rannyaya Lakomka'

(см. табл. 9). Максимальную формоустойчивость продемонстрировал хлеб с включением образцов кукурузы, предназначенной для получения амилопектинового крахмала. Наихудшим по этому показателю, наряду с пшеничным хлебом, был хлеб с примесью образцов 'Местная Белая Кремнистая' (2n) (крупяного назначения) и 'Ранняя Лакомка' (2n) (сахарная кукуруза).

Обобщая результаты хлебопекарной оценки, можно сделать выводы о том, что в целом кукурузный компонент выступает в качестве улучшителя для пшеничной муки за счет укрепления каркаса мякиша, поэтому наиболее эффективен в смесях со слабым пшеничным компонентом; в других случаях он может препятствовать подъему теста, что приводит к снижению объема хлеба.

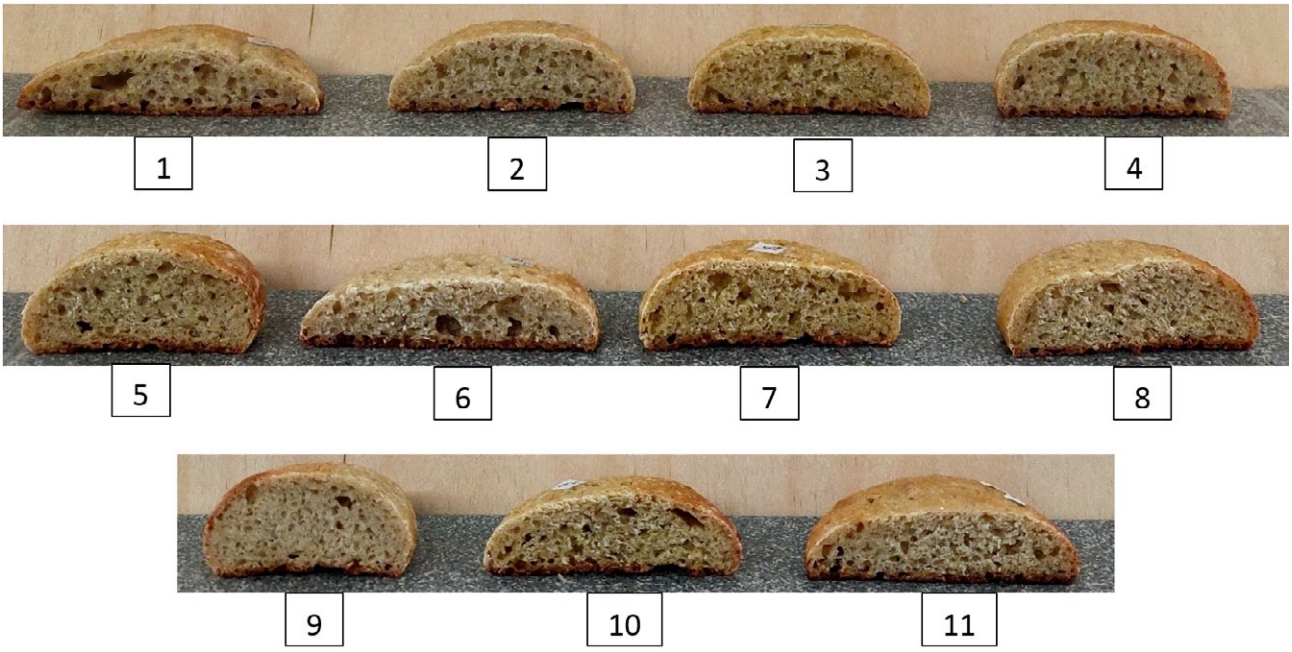


Рис. 3. Лабораторная подовая пробная выпечка пшенично-кукурузного хлеба. Использованы кукурузные образцы (слева направо и сверху вниз): 1 – контроль (пшеничный хлеб); **2** – 'Кабардинская Белая Зубовидная'; **3** – Попкорн; **4** – 'Белозерная Тетраплоидная'; **5** – 'Восковидная Диплоидная'; **6** – 'Местная Белая Кремнистая'; **7** – 'Кабардинская 3812'; **8** – 'Баксанская Сахарная'; **9** – 'Восковидная Тетраплоидная'; **10** – 'Тетра-1'; **11** – 'Ранняя Лакомка'

Fig. 3. Wheat-maize bread samples obtained in the laboratory hearth-baking test. Maize accessions involved (left to right, and top to bottom): 1 – control (wheat bread); **2** – 'Kabardinskaya Belaya Zubovidnaya'; **3** – Popcorn; **4** – 'Belozernaya Tetraploidnaya'; **5** – 'Voskovidnaya Diploidnaya'; **6** – 'Mestnaya Belaya Kremnistaya'; **7** – 'Kabardinskaya 3812'; **8** – 'Baksanskaya Sakharnaya'; **9** – 'Voskovidnaya Tetraploidnaya'; **10** – 'Tetra-1'; **1** – 'Rannyaya Lakomka'

Таблица 9. Результаты лабораторной подовой пробной выпечки пшенично-кукурузного хлеба

Table 9. Results of the laboratory hearth-baking test for wheat-maize bread

Образец	Формоустойчивость h/d	Плотность мякиша, г/мл	Твердость мякиша, г нагрузки	Черствение мякиша за сутки, г нагрузки	Твердость мякиша через сутки, г нагрузки
'Кабардинская Белая Зубовидная'	0,34	0,43	3177	2617	5794
'Белозерная Тетраплоидная'	0,38	0,4	3196	3469	6665
'Местная Белая Кремнистая'	0,23	0,53	2631	2324	4955
'Баксанская Сахарная'	0,36	0,49	2344	1797	4141
'Ранняя Лакомка'	0,28	0,45	1657	2172	3829
'Восковидная Тетраплоидная'	0,5	0,45	4350	2342	6692
'Восковидная Диплоидная'	0,42	0,44	2877	2984	5861
'Кабардинская 3812'	0,33	0,49	2282	3672	5954
'Тетра-1'	0,32	0,45	3367	3477	6844

Таблица 9. Окончание
Table 9. The end

Образец	Формоустойчивость h/d	Плотность мякиша, г/мл	Твердость мякиша, г нагрузки	Черствение мякиша за сутки, г нагрузки	Твердость мякиша через сутки, г нагрузки
Попкорн	0,33	0,46	2861	2513	5374
Пшеница	0,23	0,48	1520	2031	3551
M ± m	0,34 ± 0,02	0,46 ± 0,01	2751,09 ± 254,09	2672,55 ± 201,63	5423,64 ± 370,05
Me	0,33	0,45	2861	2513	5794
σ	0,08	0,04	803,49	637,60	1170,2
C_v,%	23,35	7,61	29,21	23,86	21,58

Сильное влияние при этом оказывают образцы с высоким содержанием амилопектинового крахмала. Наиболее инертными при выпечке являются образцы сахарной кукурузы.

Заключение

В результате проведенных нами исследований установлены различия между хозяйственными группами кукурузы по твердозерности (гранулометрическому составу), по потенциалу набухания частиц размолотого зерна, по термодинамическим свойствам крахмала, по степени и характеру воздействия на пшеничный компонент при совместной переработке на уровне реологии клейковины, теста и клейстера, а также хлебной выпечки. Показано укрепление белкового комплекса, подавление ферментативных процессов. Это позволяет прогнозировать направление хозяйственного использования новых генотипов и образцов кукурузы. Выявлены различия технологических свойств внутри технологических или хозяйственных групп, что дает возможность вести селекционный отбор по этим признакам. Наиболее выраженные улучшения продуктов совместной с пшеницей переработки установлены для образцов, предназначенных для получения крахмала, причем происходит это как за счет белкового, так и углеводного комплексов. Значительным технологическим потенциалом для улучшения хлебобулочной продукции обладают также образцы мукомольного, крупяного и кормового направления. Наиболее инертны при совместной с пшеницей переработке образцы сахарной кукурузы; они могут быть использованы для получения функциональных продуктов питания, когда не стоит задача технологического улучшения смесевого продукта. Оптимальным образом характеризует смесительную способность кукурузной муки фаринографическая оценка. Однако эту же способность характеризуют и результаты более скоростного и экономичного седиментационного анализа, причем без обращения к смешиванию с реципиентом (пшеничной мукой). Наиболее полную характеристику термодинамических свойств кукурузного крахмала в продуктах размола зерна дает параллельное использование виско-амилографии и определения числа падения, которые в ряде случаев дополняют друг друга. Значимых отличий по качественным признакам муки, связанных с плоидностью кукурузы, не обнаружено.

References / Литература

An N.N., Li D., Wang L.J., Wang Y. Microwave irradiation of corn kernels: Effects on structural, thermal, functional and rheological properties of corn flour. *Food Hydrocolloids*. 2023;143:108939. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2023.108939

Arendt E.K., Dal Bello F. Functional cereal products for those with gluten intolerance. In: B.R. Hamaker (ed.). *Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. Technology of Functional Cereal Products*. Sawston: Woodhead Publishing; 2008. p.446-475. DOI: 10.1533/9781845693886.2.446

Caballero-Rothar N.N., Borrás L., Gerde J.A. Physical and chemical kernel traits affect starch digestibility and glycemic index of cooked maize flours. *Food Chemistry*. 2022;369;130953. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.130953

De Alcântara R.G., de Carvalho R.A., Vanin F.M. Evaluation of wheat flour substitution type (corn, green banana and rice flour) and concentration on local dough properties during bread baking. *Food Chemistry*. 2020;326:126972. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.126972

Ferreira M.P.K., Ribeiro V.A.G, Barros J.H.T., Steel C.J. Strategies to improve the quality of wheat flour in baking: a review. *Brazilian Journal of Food Technology*. 2025;28:e2024046. DOI: 10.1590/1981-6723.04624

Gu Y., Cheng L., Li C., Li Z., Gu Z., Hong Y. Effects of wheat flour substitution with high-amylose corn flour on the quality of dough and Chinese steamed bread. *Starch*. 2023;75(11-12):2300088. DOI: 10.1002/STAR.202300088

Guadarrama-Lezama A.Y., Carrillo-Navas H., Vernon-Carter E.J., Alvarez-Ramirez J. Rheological and thermal properties of dough and textural and microstructural features of bread obtained from nixtamalized corn/wheat flour blends. *Journal of Cereal Science*. 2016;69:158-165. DOI: 10.1016/j.jcs.2016.03.011

Holding D.R, Larkins B.A. Zein storage proteins. In: A.L. Kriz, B.A. Larkins (eds). *Molecular Genetic Approaches to Maize Improvement*. Berlin: Springer; 2009. p.269-286. DOI: 10.1007/978-3-540-68922-5_19

Khrapko O.P., Sokol N.V., Sanzharovskaya N.S. Using high-lysine corn flour in the bread-making process. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;1052:012014. DOI: 10.1088/1755-1315/1052/1/012014

Kibkalo I. Effectiveness of and perspectives for the sedimentation analysis method in grain quality evaluation in var-

ious 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

Kibkalo I.A., Zhuk E.A. Technological properties of the carbohydrate complex of corn grain depending on the variety. *Osnovy i perspektivt organicheskikh tekhnologiy = Fundamentals and Perspectives of Organic Biotechnology*. 2022;(3):15-19. [in Russian] (Кибкало И.А., Жук Е.А. Технологические свойства углеводного комплекса зерна кукурузы в зависимости от сорта. *Основы и перспективы органических биотехнологий*. 2022;(3):15-19).

Sotchenko V.S. Maize breeding, seed production, and cultivation technology (Selektsiya, semenovodstvo, tekhnologiya vozdelyvaniya kukuruzy). Pyatigorsk; 2009. [in Russian] (Сотченко В.С. Селекция, семеноводство, технология возделывания кукурузы. Пятигорск; 2009).

StatSoft Russia: [website]. Available from: https://1soft.space/en/statsoft-statisica [accessed Jul. 11, 2023].

Vásquez F., Verdú S., Islas A.R., Barat J.M., Grau R. Effect of low degrees of substitution in wheat flour with sorghum, oat or corn flours on physicochemical properties of composite flours. *Cogent Food and Agriculture*. 2016;2(1):1269979. DOI: 10.1080/23311932.2016.1269979

Wu Y., Messing J. Proteome balancing of the maize seed for higher nutritional value. *Frontiers in Plant Science*. 2014;5:240. DOI: 10.3389/fpls.2014.00240

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

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, 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 17.08.2025; одобрена после рецензирования 13.03.2026; принята к публикации 24.04.2026.
The article was submitted on 17.08.2025; approved after reviewing on 13.03.2026; accepted for publication on 24.04.2026.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 633.854.78:581.132
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o14

CC BY

Содержание хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов в листьях коллекционных генотипов кунжута (*Sesamum indicum* L.) в условиях Ташкентской области Республики Узбекистан

Е. Б. Пирназаров, Б. Х. Аманов

Чирчикский государственный педагогический университет, Чирчик, Узбекистан

Автор, ответственный за переписку: Ербол Бакирович Пирназаров, e.pirnazarov@cspu.uz

Актуальность. В условиях аридизации климата и нарастания водного дефицита в Республике Узбекистан кунжут (*Sesamum indicum* L.) рассматривается как перспективная масличная культура, способная адаптироваться к высоким температурам и ограниченной влагообеспеченности. Однако физиолого-биохимические особенности фотосинтетического аппарата различных генотипов кунжута остаются недостаточно изученными, что ограничивает возможности целенаправленного селекционного отбора устойчивых форм.
Материалы и методы. Исследованы 12 коллекционных генотипов кунжута различного эколого-географического происхождения, выращенных в условиях Кибрайского района Ташкентской области в 2025 г. Содержание хлорофиллов *a*, *b*, их суммы и каротиноидов в листьях определяли спектрофотометрически после экстракции 96-процентным этанолом в фазах бутонизации, цветения и начала формирования коробочек по формулам Лихтенталера.
Результаты. Установлено, что концентрация хлорофилла *a* (Chl *a*) в течение генеративного периода оставалась относительно стабильной (1,06–1,18 мг/г), тогда как содержание Chl *b* проявляло выраженную фазовую динамику, снижаясь к цветению и возрастая на стадии формирования коробочек. Максимальные значения суммарного хлорофилла (1,97 мг/г) отмечены на поздней фазе. Отношение Chl *a*/*b* варьировало в пределах 1,6–2,4, достигая максимума в фазе цветения и минимума в фазе плодообразования. Индекс Car/Chl (*a*+*b*) возрастал до 0,195 в период цветения и снижался до 0,108 к началу формирования плодов. Среди генотипов наибольшие уровни хлорофиллов и каротиноидов выявлены у К66, К161 и К1396, что указывает на их повышенную фотозащитную способность и потенциальную стрессоустойчивость.
Заключение. Полученные данные подтверждают выраженную фазовую и генотипическую вариабельность пигментной системы кунжута. Генотипы К66, К161 и К1396 могут быть рекомендованы в качестве исходного материала для селекционной работы, направленной на повышение засухоустойчивости и продуктивности культуры в аридных условиях.

Ключевые слова: фотосинтетическая активность, пигментная система растений, физиология фотосинтеза, адаптация к засухе, аридный климат, селекция масличных культур

Благодарности: исследование выполнено без внешнего финансирования.
Авторы выражают признательность Научно-исследовательскому институту генетических ресурсов растений Республики Узбекистан за предоставление материалов и создание условий для проведения эксперимента.

Для цитирования: Пирназаров Е.Б., Аманов Б.Х. Содержание хлорофилла *a*, *b* и каротиноидов в листьях коллекционных генотипов кунжута (*Sesamum indicum* L.) в условиях Ташкентской области Республики Узбекистан. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(2):83-91. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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.

© Пирназаров Е.Б., Аманов Б.Х., 2026

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o14

Chlorophyll *a* and *b* and carotenoid content in the leaves of sesame (*Sesamum indicum* L.) collection genotypes under the conditions of Tashkent Region, Republic of Uzbekistan

Erbol B. Pirnazarov, Bakhtiyar Kh. Amanov

Chirchik State Pedagogical University, Chirchik, Uzbekistan

Corresponding author: Erbol B. Pirnazarov, e.pirnazarov@cspu.uz

Background. Under the conditions of climate aridization and increasing water deficit in Uzbekistan, sesame (*Sesamum indicum* L.) is considered a promising oilseed crop, capable of adapting to high temperatures and limited water availability. However, physiological and biochemical features of the photosynthetic apparatus in different sesame genotypes remain insufficiently studied, which limits targeted breeding of stress-tolerant forms.
Materials and methods. Twelve sesame collection genotypes of diverse ecogeographic origin, grown in Qibray District, Tashkent Region, in 2025, were studied. The content of chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, their total, and carotenoids in leaves was measured spectrophotometrically after extraction with 96% ethanol at the stages of budding, flowering, and the onset of capsule formation, using Lichtenthaler's formulas.
Results. The concentration of chlorophyll *a* (Chl *a*) was found to remain relatively stable during the generative period (1.06–1.18 mg/g), whereas the content of Chl *b* exhibited pronounced phase-dependent dynamics, decreasing toward flowering and increasing in the stage of capsule formation. The highest values of total chlorophyll (1.97 mg/g) were recorded in the late development stage. The Chl *a*/*b* ratio varied from 1.6 to 2.4, reaching its maximum during flowering, and minimum during fruit formation. The Car/Chl (*a*+*b*) index increased to 0.195 during flowering and declined to 0.108 at the onset of fruit development. Among the genotypes, K66, K161, and K1396 showed the highest levels of chlorophylls and carotenoids, which attest to their enhanced photoprotective capacity and potential stress tolerance.
Conclusion. The obtained data confirm pronounced phase-related and genotypic variability of the pigment system in sesame leaves. Genotypes K66, K161, and K1396 may be recommended as source material for breeding programs aimed at improving drought tolerance and productivity of the crop under arid conditions.

Keywords: photosynthetic activity, plant pigment system, photosynthesis physiology, adaptation to drought, arid climate, oilseed crop breeding

Acknowledgments: the study was conducted without external funding.
The authors express their gratitude to the Research Institute of Plant Genetic Resources of the Republic of Uzbekistan for providing plant material and creating favorable conditions for the experiment.

For citation: Pirnazarov E.B., Amanov B.Kh. Chlorophyll *a* and *b* and carotenoid content in the leaves of sesame (*Sesamum indicum* L.) collection genotypes under the conditions of Tashkent Region, Republic of Uzbekistan. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(2):83-91. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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

Кунжут (*Sesamum indicum* L.) – одна из древнейших масличных культур, отличающаяся высокой пищевой, фармакологической и агротехнической ценностью. Для нее характерны засухоустойчивость, короткий вегетационный период и способность расти в регионах с жарким климатом и дефицитом воды (https://pfaf.org/user/Plant.aspx?LatinName=Sesamum+indicum). В условиях глобального потепления и нестабильности осадков кунжут рассматривается как перспективная культура для адаптивного земледелия и диверсификации посевов (Berhe et al., 2024).

Главным параметром, определяющим эффективность фотосинтеза, является состояние пигментной системы. Хлорофилл *a* (Chl *a*) отвечает за первичное поглощение света и передачу энергии в реакционные центры, а хлорофилл *b* (Chl *b*) расширяет спектр поглощаемого света, входя в состав антенн фотосистемы II. Соотношение Chl *a/b* служит индикатором структурной организации фотосинтетического аппарата: высокие значения отражают относительно большую долю реакционных центров и уменьшение светособирающих антенн, тогда как низкие значения свидетельствуют об увеличении доли Chl *b* в антеннах фотосистемы II и усилении светособирающей функции (Lichtenthaler, Babani, 2021). Каротиноиды (лютеин, β-каротин, зеаксантин и др.) участвуют в передаче энергии хлорофиллам и выполняют фотозащитную функцию. Отношение Car/Chl (*a+b*) отражает антиоксидантный потенциал фотосинтетического аппарата: повышенные значения индекса (0,18–0,25) свидетельствуют об усилении фотозащитных механизмов и устойчивости растений к фотострессу (Chugh et al., 2024).

Фотосинтетические пигменты широко используются как физиологические маркеры устойчивости растений к абиотическим стрессам. Показано, что засоление, переувлажнение и дефицит влаги приводят к снижению содержания хлорофиллов и изменению их соотношения: как правило, наблюдается увеличение отношения Chl *a/b*, что связано с более быстрым снижением содержания Chl *b*, входящего в состав антенн фотосистемы II, и отражает перестройку фотосинтетического аппарата у кунжута и других культур. Каротиноиды играют ключевую роль в защите фотосистем от фотоокислительного повреждения, особенно в условиях температурного и водного стресса. В связи с этим анализ содержания хлорофиллов и каротиноидов, а также индексов Chl *a/b* и Car/Chl (*a+b*) является обоснованным инструментом оценки адаптивного потенциала генотипов кунжута (Baghery et al., 2023; Kouighat et al., 2023).

Показано, что содержание фотосинтетических пигментов у кунжута чувствительно к условиям минерального питания и физиологической регуляции роста. Применение регуляторов роста и оптимизация элементов питания приводят к увеличению содержания хлорофиллов и усилению фотосинтетической активности. Это подчеркивает функциональную значимость пигментной системы как интегрального показателя физиологического состояния растений и их продукционного потенциала (Lichtenthaler, 1987; Lichtenthaler, Babani, 2021).

Несмотря на растущий интерес к кунжуту как к адаптивной культуре, физиолого-биохимические параметры его генотипов, особенно в условиях аридных регионов, остаются недостаточно изученными. В ряде исследований установлено, что устойчивые к стрессу генотипы кунжута сохраняют более высокий уровень хлорофиллов и каротиноидов в стрессовых условиях, что может быть использовано при отборе в селекции (Yousefzadeh, Ehsanzadeh, 2017; Habibullah et al., 2021; Pandey et al., 2021).

Цель настоящего исследования – изучить динамику содержания хлорофиллов *a* и *b*, их суммы, каротиноидов и их соотношений у коллекционных генотипов кунжута в течение генеративного периода, а также оценить селекционную ценность генотипов на основе этих показателей.

Материалы и методы

В исследование включили 12 коллекционных образцов кунжута (*Sesamum indicum* L.) из Национального генофонда сельскохозяйственных культур Научно-исследовательского института генетических ресурсов растений Республики Узбекистан. Генотипы происходили из Узбекистана (контрольный сорт 'Tashkentskiy-122'), Афганистана (K66), Венесуэлы (K9428), Ирана (K119), Армении (K98), Турции (K161), Кении (K1396), Индии (K9549), Китая (K598), Таджикистана (K1185), Израиля (K221) и Сирии (K216). Разнообразие происхождения предполагало различия в адаптивных свойствах. Полевой опыт провели в 2025 г. в Кибрайском районе Ташкентской области (41°20' с. ш., 69°40' в. д., 350 м н. у. м.). Почва – серозем (2,0% гумуса, pH = 7,5) со средней обеспеченностью азотом и фосфором. Метеорологические условия 2025 г. в период проведения эксперимента характеризовались типичным для региона аридным климатом. Средняя температура воздуха в вегетационный период (май – август) составляла 27,4°C. Максимальные дневные температуры в июле достигали 38–40°C. Суммарное количество атмосферных осадков за период вегетации составило около 45–60 мм. Количество атмосферных осадков распределялось по месяцам следующим образом: в июне – около 18 мм, в июле – около 14 мм и в августе – около 13 мм. Относительная влажность воздуха в летние месяцы составляла 35–45%. Для всех генотипов применяли одинаковую агротехнологию: посев проводили в оптимальные для региона сроки, междурядья составляли 60 см, уход за посевами включал междурядную культивацию и ручную прополку. Опыт выращивали в условиях естественного увлажнения без дополнительного орошения.

Листовые пробы отбирали в трех фазах онтогенеза: начало бутонизации (25–30-й день после всходов), полное цветение (40–50-й день) и формирование коробочек (60–70-й день). В каждой фазе у 12 растений каждого генотипа срезали 3–4-й полностью развернутый лист главного стебля (три повторности на растение). Навеска листа составляла 0,50 ± 0,02 г. Отбор проводили утром (до 09:00), чтобы уменьшить суточные колебания пигментного состава. Листовую ткань помещали в пробирки с 5 мл 96-процентного этанола и выдерживали при комнатной температуре в темноте. После экстракции суспензию фильтровали, фильтрат доводили до исходного объема. Основы спектрофотометрического определения фотосинтетических пигментов в листьях растений были заложены в классических работах по биохимии хлоропластов (Arnon, 1949) и впоследствии стандартизированы в методических руководствах по анализу хлорофиллов и каротиноидов (Lichtenthaler, Wellburn, 1983; Lichtenthaler, 1987).

Оптическую плотность экстрактов измеряли на спектрофотометре Metash UV-5100 при длинах волн 664, 649 и 470 нм. Содержание хлорофиллов и каротиноидов рассчитывали по формулам Лихтенталера для этанольных экстрактов (Lichtenthaler, Wellburn, 1983; Lichtenthaler, 1987; Lichtenthaler, Babani, 2021). Содержание хлорофиллов и каротиноидов рассчитывали по формулам (1–4) Лихтенталера для этанольных экстрактов:

$$\text{Chl } a = 13{,}36\ A_{664} - 5{,}19\ A_{649}, \quad (1)$$

$$\text{Chl } b = 27{,}43\ A_{649} - 8{,}12\ A_{664}, \quad (2)$$

$$\text{Chl } (a+b) = 5{,}24\ A_{664} + 22{,}24\ A_{649}, \quad (3)$$

$$\text{Car} = \frac{1000\ A_{470} - 2{,}13\ Chl\ a - 97{,}64\ Chl\ b}{209}, \quad (4)$$

где A_{λ} – оптическая плотность экстракта при длине волны λ (нм); A_{470}, A_{649} и A_{664} – оптическая плотность при длинах волн 470, 649 и 664 нм соответственно;

Chl *a* – содержание хлорофилла *a*;

Chl *b* – содержание хлорофилла *b*;

Chl (*a*+*b*) – суммарное содержание хлорофиллов *a* и *b*;

Car – содержание каротиноидов.

Полученные значения выражали в миллиграммах на грамм сырой массы (мг/г). Для каждого растения вычисляли соотношения Chl *a*/*b* и Car/Chl (*a*+*b*).

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с использованием дисперсионного анализа (ANOVA). Для оценки достоверности различий между генотипами и фазами развития рассчитывали наименьшую существенную разницу (НСР) при уровне значимости $P \le 0{,}05$. Для каждого показателя определяли среднее значение (M), стандартное отклонение (SD) и стандартную ошибку среднего (SE).

Результаты

В условиях Ташкентской области суммарный хлорофилл Chl (*a*+*b*) у исследованных генотипов варьировал в пределах 1,5–2,0 мг/г. В фазе бутонизации среднее по генотипам содержание Chl *a* составляло 1,065 мг/г, Chl *b* – 0,542 мг/г, Chl (*a*+*b*) – 1,607 мг/г, каротиноидов – 0,261 мг/г. К фазе цветения эти показатели достигали 1,156; 0,485; 1,641 и 0,318 мг/г соответственно. Фазовая динамика фотосинтетических пигментов представлена на рисунке 1.

К началу формирования коробочек наблюдался заметный рост Chl *b* (до 0,792 мг/г, +63% к фазе цветения) при умеренном увеличении Chl *a* (до 1,182 мг/г) и снижении содержания каротиноидов (до 0,206 мг/г). Благодаря этому суммарный хлорофилл достиг максимума (1,974 мг/г, рост +20% относительно фазы цветения), тогда как доля каротиноидов от суммы хлорофиллов снизилась до 0,108, что представлено в таблице 1.

Диапазон значений содержания фотосинтетических пигментов у отдельных генотипов свидетельствовал о выраженной внутривидовой вариабельности. Межгенотипические различия по уровню хлорофиллов и каротиноидов в различные фазы развития растений представлены в таблице 2, а их графическое распределение показано на рисунке 2.

Максимальные значения Chl *a* относительного фазовой средней отмечены у К161 (Турция) и К66 (Афганистан), а минимальные – у К98 (Армения). По содержанию каротиноидов лидировали контрольный сорт 'Tashkentskiy-122' и К1396, тогда как наименьшие значения зафиксированы у К161 в фазе формирования коробочек (0,13 мг/г).

Диапазон значений у отдельных генотипов свидетельствовал о выраженной внутривидовой вариабель-

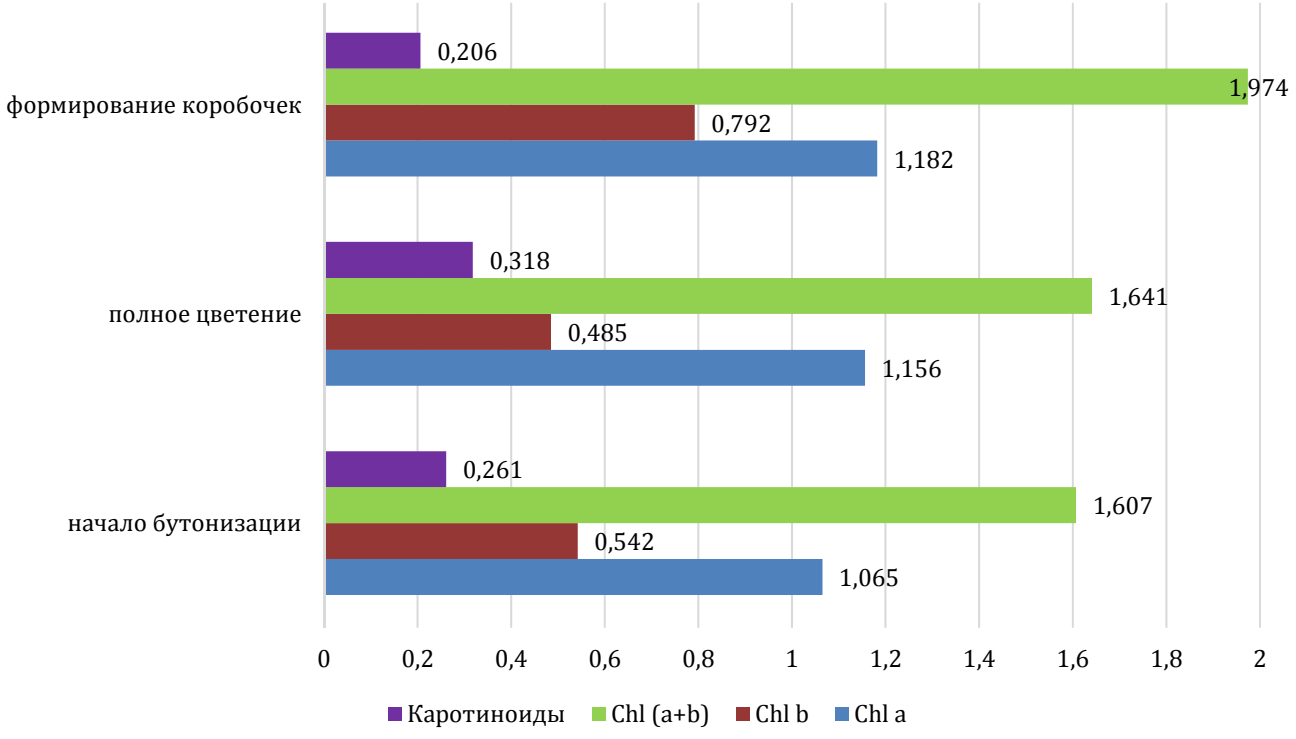


Рис. 1. Динамика фотосинтетических пигментов по фазам вегетации кунжута, мг/г

Fig. 1. Dynamics of photosynthetic pigments across sesame growth stages, mg/g

Таблица 1. **Среднее (± SD) содержание пигментов (мг/г) в листьях кунжута на разных фазах вегетации (n = 12 генотипов)**

Table 1. **Mean (± SD) pigment content (mg g^{-1}) in sesame leaves at different growth stages (n = 12 genotypes)**

Фаза / Stage	Chl *a*	Chl *b*	Chl (*a+b*)	Каротиноиды / Carotenoids
начало бутонизации / onset of budding	1,065 ± 0,109	0,542 ± 0,117	1,607 ± 0,193	0,261 ± 0,049
полное цветение / full flowering	1,156 ± 0,098	0,485 ± 0,074	1,641 ± 0,156	0,318 ± 0,039
формирование коробочек / capsule formation	1,182 ± 0,197	0,792 ± 0,257	1,974 ± 0,373	0,206 ± 0,067

Таблица 2. **Содержание фотосинтетических пигментов (хлорофилл *a*, хлорофилл *b*, их сумма и каротиноиды) в листьях генотипов кунжута (*Sesamum indicum* L.) в различные фазы развития растений (мг/г сырой массы)**

Table 2. **Content of photosynthetic pigments (chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, total chlorophyll, and carotenoids) in the leaves of sesame genotypes (*Sesamum indicum* L.) at different development stages (mg/g fresh weight)**

Генотип / Genotype	Chl *a*	Chl *b*	Chl (*a+b*)	Car	Chl *a/b*	Car/Chl (*a+b*)
Начало бутонизации / Onset of budding						
'Tashkentskiy-122', контроль	1,15 ± 0,06	0,55 ± 0,02	1,70 ± 0,06	0,30 ± 0,01	2,09	0,18
K66	1,19 ± 0,04	0,51 ± 0,01	1,71 ± 0,05	0,31 ± 0,01	2,33	0,18
K9428	1,19 ± 0,03	0,64 ± 0,03	1,84 ± 0,06	0,29 ± 0,01	1,85	0,16
K119	1,01 ± 0,04	0,79 ± 0,04	1,81 ± 0,08	0,16 ± 0,01	1,28	0,09
K98	1,00 ± 0,02	0,48 ± 0,01	1,49 ± 0,04	0,26 ± 0,01	2,08	0,17
K161	1,15 ± 0,05	0,58 ± 0,02	1,74 ± 0,04	0,28 ± 0,01	1,98	0,16
K1396	1,21 ± 0,04	0,67 ± 0,01	1,89 ± 0,05	0,18 ± 0,01	1,81	0,10
K9549	0,90 ± 0,03	0,49 ± 0,02	1,41 ± 0,04	0,22 ± 0,01	1,84	0,16
K598	0,99 ± 0,03	0,40 ± 0,01	1,41 ± 0,03	0,31 ± 0,02	2,48	0,22
K1185	1,04 ± 0,03	0,49 ± 0,02	1,54 ± 0,04	0,29 ± 0,00	2,13	0,19
K221	0,96 ± 0,02	0,39 ± 0,01	1,35 ± 0,03	0,28 ± 0,01	2,44	0,21
K216	0,96 ± 0,02	0,45 ± 0,02	1,42 ± 0,03	0,26 ± 0,01	2,13	0,18
НСР	0,11	0,05	0,14	0,03	0,37	0,04
Полное цветение / Full flowering						
'Tashkentskiy-122', контроль	1,13 ± 0,02	0,45 ± 0,01	1,58 ± 0,03	0,37 ± 0,02	2,51	0,23
K66	1,38 ± 0,01	0,62 ± 0,01	1,99 ± 0,01	0,35 ± 0,01	2,23	0,18
K9428	1,18 ± 0,01	0,44 ± 0,02	1,62 ± 0,03	0,35 ± 0,01	2,68	0,22
K119	1,05 ± 0,05	0,54 ± 0,02	1,60 ± 0,04	0,30 ± 0,02	1,94	0,19
K98	1,18 ± 0,01	0,53 ± 0,02	1,71 ± 0,01	0,32 ± 0,01	2,23	0,19
K161	1,16 ± 0,02	0,52 ± 0,00	1,68 ± 0,03	0,30 ± 0,00	2,23	0,18
K1396	1,03 ± 0,05	0,38 ± 0,01	1,41 ± 0,06	0,32 ± 0,02	2,71	0,23
K9549	1,28 ± 0,05	0,50 ± 0,01	1,78 ± 0,04	0,34 ± 0,01	2,56	0,19
K598	1,16 ± 0,03	0,42 ± 0,01	1,58 ± 0,04	0,34 ± 0,00	2,76	0,22
K1185	1,04 ± 0,02	0,37 ± 0,02	1,41 ± 0,04	0,33 ± 0,01	2,81	0,23
K221	1,13 ± 0,05	0,50 ± 0,02	1,63 ± 0,04	0,27 ± 0,02	2,26	0,17
K216	1,15 ± 0,05	0,55 ± 0,01	1,70 ± 0,06	0,23 ± 0,01	2,09	0,14
НСР	0,11	0,05	0,14	0,04	0,39	0,05

Таблица 2. Окончание
Table 2. The end

Генотип / Genotype	Chl *a*	Chl *b*	Chl (*a+b*)	Car	Chl *a/b*	Car/Chl (*a+b*)
Формирование коробочек / Capsule formation						
'Tashkentskiy-122', контроль	1,00 ± 0,02	1,29 ± 0,02	2,29 ± 0,04	0,15 ± 0,00	0,78	0,07
K66	1,17 ± 0,04	0,98 ± 0,01	2,16 ± 0,05	0,17 ± 0,01	1,19	0,08
K9428	1,32 ± 0,03	0,85 ± 0,02	2,17 ± 0,05	0,22 ± 0,01	1,55	0,10
K119	1,31 ± 0,03	1,04 ± 0,05	2,35 ± 0,06	0,15 ± 0,01	1,58	0,11
K98	0,86 ± 0,01	0,38 ± 0,01	1,24 ± 0,02	0,16 ± 0,01	2,26	0,13
K161	1,59 ± 0,06	0,93 ± 0,05	2,52 ± 0,11	0,30 ± 0,01	1,71	0,12
K1396	1,37 ± 0,02	0,75 ± 0,03	2,13 ± 0,02	0,32 ± 0,01	1,88	0,15
K9549	1,14 ± 0,01	0,41 ± 0,02	1,55 ± 0,04	0,30 ± 0,02	2,78	0,19
K598	1,16 ± 0,03	0,75 ± 0,03	1,92 ± 0,03	0,16 ± 0,01	1,55	0,08
K1185	1,13 ± 0,02	0,72 ± 0,04	1,84 ± 0,04	0,22 ± 0,01	1,57	0,12
K221	1,13 ± 0,05	0,80 ± 0,01	1,93 ± 0,06	0,13 ± 0,01	1,41	0,07
K216	0,98 ± 0,00	0,59 ± 0,02	1,58 ± 0,02	0,19 ± 0,00	1,66	0,12
НСР	0,14	0,11	0,18	0,04	0,42	0,05
Среднее по фазам / Mean across stages						
'Tashkentskiy-122', контроль	1,09 ± 0,02	0,76 ± 0,01	1,86 ± 0,03	0,27 ± 0,01	1,79	0,16
K66	1,25 ± 0,02	0,70 ± 0,01	1,95 ± 0,02	0,28 ± 0,01	1,92	0,15
K9428	1,23 ± 0,02	0,64 ± 0,01	1,88 ± 0,03	0,29 ± 0,01	2,03	0,16
K119	1,12 ± 0,03	0,79 ± 0,02	1,92 ± 0,04	0,20 ± 0,01	1,60	0,13
K98	1,01 ± 0,01	0,46 ± 0,01	1,48 ± 0,02	0,25 ± 0,01	2,19	0,16
K161	1,30 ± 0,03	0,68 ± 0,02	1,98 ± 0,04	0,29 ± 0,01	1,97	0,15
K1396	1,20 ± 0,03	0,60 ± 0,01	1,81 ± 0,04	0,27 ± 0,01	2,13	0,16
K9549	1,11 ± 0,02	0,47 ± 0,01	1,58 ± 0,03	0,29 ± 0,01	2,39	0,18
K598	1,10 ± 0,02	0,52 ± 0,01	1,64 ± 0,03	0,27 ± 0,01	2,26	0,17
K1185	1,07 ± 0,02	0,53 ± 0,01	1,60 ± 0,03	0,28 ± 0,01	2,17	0,18
K221	1,07 ± 0,03	0,56 ± 0,01	1,64 ± 0,04	0,23 ± 0,01	2,04	0,15
K216	1,03 ± 0,02	0,53 ± 0,01	1,57 ± 0,03	0,23 ± 0,01	1,96	0,15
НСР	0,12	0,07	0,15	0,04	0,39	0,05

ности содержания фотосинтетических пигментов. В фазе начала бутонизации содержание Chl *a* изменялось от 0,90 мг/г у генотипа K9549 (Индия) до 1,21 мг/г у генотипа K1396 (Кения). Содержание Chl *b* варьировало от 0,39 мг/г у генотипа K221 до 0,79 мг/г у генотипа K119. Суммарное содержание хлорофиллов Chl (*a+b*) находилось в пределах 1,35–1,89 мг/г, минимальные значения отмечены у генотипа K221, максимальные – у K1396. Содержание каротиноидов составляло 0,16–0,31 мг/г.

В фазе полного цветения содержание Chl *a* изменялось в пределах 1,03–1,38 мг/г, минимальные значения отмечены у генотипа K1396, максимальные – у K66. Содержание Chl *b* составляло 0,37–0,62 мг/г. Суммарное содержание хлорофиллов варьировало от 1,41 до 1,99 мг/г, тогда как содержание каротиноидов находилось в диапазоне 0,23–0,37 мг/г.

В фазе формирования коробочек содержание Chl *a* варьировало от 0,86 мг/г у генотипа K98 до 1,59 мг/г у генотипа K161. Содержание Chl *b* изменялось в пределах 0,38–1,29 мг/г, а суммарное содержание хлорофиллов – от 1,24 до 2,52 мг/г. Содержание каротиноидов составляло 0,13–0,32 мг/г.

Полные данные по содержанию фотосинтетических пигментов у всех генотипов и во всех фазах развития растений приведены в таблице 2.

Индексы Chl *a/b* и Car/Chl (*a+b*) отражали адаптивную перестройку фотосинтетического аппарата. Значе-

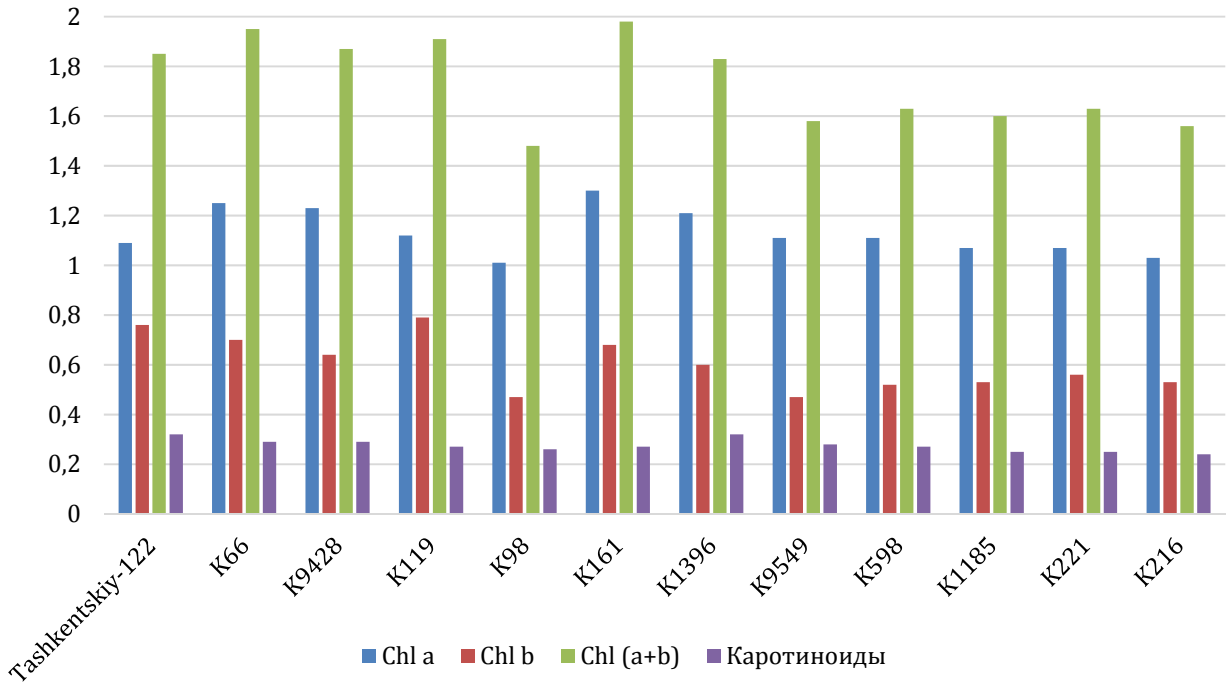


Рис. 2. Среднее содержание пигментов у генотипов кунжута, мг/г

Fig. 2. Mean pigment content in sesame genotypes, mg/g

ния Chl *a/b* у кунжута (1,6–2,4) были ниже, чем характерные для многих C_3-культур, таких как пшеница (*Triticum aestivum* L.), рис (*Oryza sativa* L.) и соя (*Glycine max* L.) (2,6–3,3), что указывает на относительно большую долю Chl *b* в антеннах фотосистемы II и соответствует данным литературы. Минимальный индекс (1,6) отмечен в фазе формирования коробочек, максимальный (2,42) – в фазе цветения. Показатель Car/Chl (*a+b*) достигал 0,195 на цветении и снижался до 0,108 к плодообразованию, что свидетельствует о фазовой динамике фотозащитных механизмов. Изменение индексов Chl *a/b* и Car/Chl (*a+b*) по фазам онтогенеза представлено на рисунке 3.

Обсуждение

Полученные значения индекса Chl *a/b* оказались ниже типичных для большинства C_3-культур. Это отражает анатомические особенности листьев кунжута: сравни-

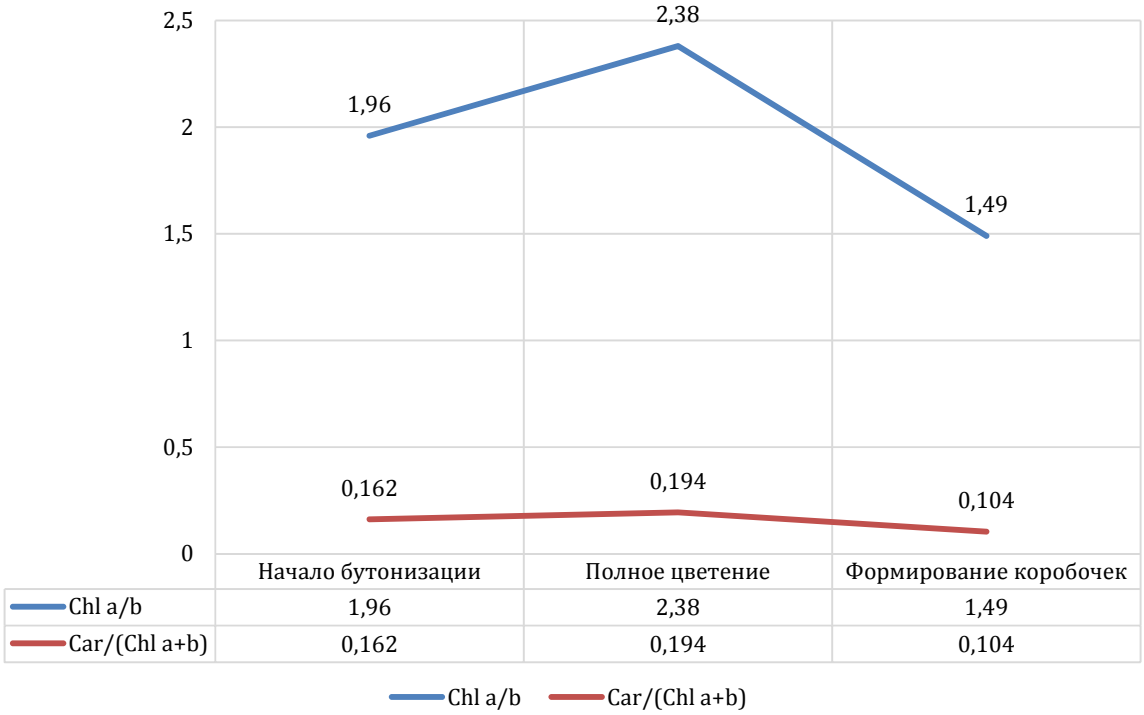


Рис. 3. Динамика соотношений Chl *a/b* и Car/Chl (*a+b*)

Fig. 3. Dynamics of the Chl *a/b* and Car/Chl (*a+b*) ratios

тельно небольшую толщину листовой пластинки, меньшее число клеток мезофилла и меньшее количество хлоропластов в них, что обеспечивает эффективное использование световой энергии без необходимости в высоком значении отношения Chl *a/b*. Подобные низкие значения для кунжута (2,0–2,4) приводятся и в гиперспектральных исследованиях (Berhe et al., 2024). Абсолютное содержание хлорофиллов у изученных генотипов кунжута (1,5–2,0 мг/г) также ниже, чем у многих злаковых и масличных культур, что связано с различиями в морфологии листьев, прежде всего их толщине, плотности мезофилла и содержании хлоропластов (Lichtenthaler, 1987; Lichtenthaler, Babani, 2021).

Ряд исследований сообщает о более высоком содержании хлорофиллов у отдельных генотипов кунжута. Так, в иранских опытах линии Hendi 9 и Karaj 1 характеризовались высоким содержанием суммарного хлорофилла, достигавшим до 182 мг/г сырой массы (Hassanzadeh et al., 2009; Baghery et al., 2023). Такое расхождение объясняется использованием других экстрагентов (ацетон, метанол), отбором листьев другого возраста и выращиванием в других условиях. Наше исследование проводилось в полевых условиях при стандартной агротехнике, что обусловило более низкие абсолютные уровни пигментов.

В фазе цветения отмечался рост индекса Chl *a/b* и относительного содержания каротиноидов, что отражает адаптацию листьев к интенсивной инсоляции и повышенную потребность в фотозащите, аналогично данным для стрессовых условий у кунжута (Chugh et al., 2024). Снижение Car/Chl (*a+b*) на поздней стадии связано с перераспределением ресурсов в пользу генеративных органов и ослаблением фотозащитных механизмов.

Снижение содержания хлорофиллов и изменение их соотношений рассматриваются как универсальная реакция фотосинтетического аппарата на абиотический стресс, что подтверждается данными других исследований, где показана тесная связь физиолого-биохимических показателей с адаптацией растений к неблагоприятным условиям среды (Kodirova et al., 2024). У кунжута переувлажнение и засоление сопровождаются деградацией Chl *b* и ростом индекса Chl *a/b*. Каротиноиды, напротив, вовлекаются в механизмы фотозащиты и антиоксидантной стабилизации мембран, особенно в фазах повышенной метаболической нагрузки (Kouighat et al., 2023). Наблюдаемая в нашем исследовании динамика Car/Chl (*a+b*) соответствует этим закономерностям. Сходные закономерности наблюдались в исследованиях у генотипов с устойчивостью к водному стрессу (Baghery et al., 2023), где такие генотипы имели меньшие повреждения фотосистем и активную антиоксидантную защиту.

Физиологическое состояние листового аппарата непосредственно связано с формированием хозяйственно ценных признаков. Для кунжута показано, что улучшение минерального питания и водного режима сопровождается ростом содержания хлорофиллов и, как следствие, повышением урожайности и масличности семян. Вариабельность фотосинтетического аппарата в конечном счете отражается и на качестве продукции, включая биохимический состав масла (Lichtenthaler, 1987; Baghery et al., 2023). Таким образом, выявленные в настоящей работе различия пигментной системы между генотипами имеют не только физиологическое, но и прямое агрономическое значение.

У генотипов, чувствительных к водному дефициту, таких как K98 и K9549, пониженные уровни хлорофилла могут быть связаны со стрессовыми нарушениями синтеза пигментов. Подобные изменения отмечены и в работе M. Yousefzadeh и P. Ehsanzadeh (2017), где при засухе наблюдалось снижение содержания хлорофиллов и увеличение доли каротиноидов как защитной реакции фотосинтетического аппарата.

В условиях переувлажнения аналогичное снижение содержания хлорофиллов и каротиноидов у генотипов, чувствительных к водному затоплению (waterlogging), было показано T. I. Anee et al. (2019), что свидетельствует о высокой уязвимости фотосинтетического аппарата растений к анаэробным условиям. Примечательно, что в отдельных экспериментах засоление приводило к увеличению содержания хлорофилла, как показано у генотипа AS15 (Dangue et al., 2022), что может быть связано с адаптацией через ионную детоксикацию и фотозащиту.

Установленные нормативные диапазоны содержания Chl *a* (1,0–1,3 мг/г), Chl *b* (0,4–0,8 мг/г) и каротиноидов (0,2–0,3 мг/г) могут служить ориентирами для экспресс-диагностики состояния посевов кунжута. Существенное снижение Chl *a* или резкое уменьшение индекса Chl *a/b* на ранних этапах онтогенеза свидетельствует о действии стрессовых факторов (засуха, переувлажнение, дефицит азота). Высокие значения Car/Chl (*a+b*) на фазе цветения отражают эффективную фотозащиту и коррелируют с продуктивностью. Генотипы, сохраняющие высокий уровень пигментов и благоприятные соотношения на поздних стадиях (K66, K161, K1396), представляют интерес как доноры признаков устойчивости для селекции; образцы с низким содержанием пигментов (K98, K9549) целесообразно использовать лишь как носители отдельных хозяйственно ценных признаков. Полученные результаты позволяют рекомендовать генотипы с высоким содержанием хлорофиллов как потенциально устойчивые, что согласуется с выводами о селекционной ценности таких форм в ряде современных исследований (Habibullah et al., 2021; Pandey et al., 2021; Baghery et al., 2023).

Заключение

В условиях аридного климата Узбекистана суммарный хлорофилл Chl (*a+b*) у исследованных генотипов кунжута варьировал в пределах 1,5–2,0 мг/г, при этом содержание Chl *a* оставалось относительно постоянным (1,06–1,18 мг/г), а содержание Chl *b* снижалось к фазе цветения и увеличивалось к фазе формирования коробочек. Индекс Chl *a/b* изменялся от 1,6 до 2,4: минимальные значения отмечены на фазе плодообразования, максимальные – на фазе цветения. Отношение Car/Chl (*a+b*) достигало 0,195 в фазе цветения и снижалось до 0,108 к фазе коробочек, отражая перестройку фотозащитной системы. Наиболее перспективными по фотосинтетическому и фотозащитному потенциалу оказались генотипы K66, K161 и K1396; они поддерживали высокие уровни хлорофиллов и каротиноидов и умеренные значения индекса Chl *a/b*. Генотип K98, напротив, характеризовался минимальными уровнями пигментов и, вероятно, низкой продуктивностью. Вариабельность содержания пигментов обусловлена как фазой онтогенеза, так и генетической принадлежностью. Полученные данные и нормативные диапазоны могут использоваться для диагностики стрессов, мониторинга состояния посевов и отбора исходного материала в селекционных программах, направленных на повышение стрессоустойчивости и урожайности кунжута.

References / Литературы

Anee T.I., Nahar K., Rahman A., Al Mahmud J., Bhuiyan T.F., Ul Alam M. et al. Oxidative damage and antioxidant defense in *Sesamum indicum* after different waterlogging durations. *Plants (Basel)*. 2019;8(7):196. DOI: 10.3390/plants8070196

Arnon D.I. Copper enzymes in isolated chloroplasts: Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*. 1949;24(1):1-15. DOI: 10.1104/pp.24.1.1

Baghery M.A., Kazemitabar S.K., Dehestani A., Khoshgoftarmanesh A.H., Afshari R.T. Sesame (*Sesamum indicum* L.) response to drought stress: susceptible and tolerant genotypes exhibit different physiological, biochemical, and molecular response patterns. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 2023;29(9):1353-1369. DOI: 10.1007/s12298-023-01372-y

Berhe M., You J., Dossa K., Li D., Zhou R., Zhang Y. et al. Examining chlorophyll extraction methods in sesame genotypes: uncovering leaf coloration effects and anatomy variations. *Plants (Basel)*. 2024;13(12):1589. DOI: 10.3390/plants13121589

Chugh V., Mishra V., Sharma V., Kumar M., Ghorbel M., Kumar H. et al. Deciphering physio-biochemical basis of tolerance mechanism for sesame genotypes under waterlogging stress at early vegetative stage. *Plants (Basel)*. 2024;13(4):501. DOI: 10.3390/plants13040501

Dangue A., Ali O.Y., Diaw D., Ndiaye M.A.F., Diop T.A. Physiology and adaptation strategy of sesame (*Sesamum indicum* L.) to salinity. *GSC Advanced Research and Reviews*. 2022;11(2):29-36. DOI: 10.30574/gscarr.2022.11.2.0117

Habibullah M., Sarkar S., Islam M.M., Ahmed K.U., Rahman M.Z., Awad M.F. et al. Assessing the response of diverse sesame genotypes to waterlogging durations at different plant growth stages. *Plants (Basel)*. 2021;10(11):2294. DOI: 10.3390/plants10112294

Hassanzadeh M., Ebadi A., Panahyan-e-Kivi M., Eshghi A.G., Jamaati-e-Somarin S., Saeidi M. et al. Evaluation of drought stress on relative water content and chlorophyll content of sesame (*Sesamum indicum* L.) genotypes at early flowering stage. *Research Journal of Environmental Sciences*. 2009;3(3):345-350. DOI: 10.3923/rjes.2009.345.350

Kodirova S., Amanov B., Muminov K.H., Abdiyev F., Buronov A., Tursunova N. et al. Physiological and biochemical parameters of the exotic species of grass pea (*Lathyrus sativus* L.). *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*. 2024;56(4):1513-1523. DOI: 10.54910/sabrao2024.56.4.17

Kouighat M., Nabloussi A., Kettani R., Fakhour S., El Fechtali M., Hamdani A. Drought-tolerant sesame mutant lines assessed by physiological traits and stress indices under water deficit conditions. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2023;14:100842. DOI: 10.1016/j.jafr.2023.100842

Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*. 1987;148:350-382. DOI: 10.1016/0076-6879(87)48036-1

Lichtenthaler H.K., Babani F. Contents of photosynthetic pigments and ratios of chlorophyll *a/b* and chlorophylls to carotenoids (*a+b*)/(*x+c*) in C_4 plants as compared to C_3 plants. *Photosynthetica*. 2021;60(1):3-9. DOI: 10.32615/ps.2021.041

Lichtenthaler H.K., Wellburn A.R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls *a* and *b* of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*. 1983;11(5):591-592. DOI: 10.1042/bst0110591

Pandey B.B., Ratnakumar P., Kiran B.U., Dudhe M.Y., Lakshmi G.S., Ramesh K. et al. Identifying traits associated with terminal drought tolerance in sesame (*Sesamum indicum* L.) genotypes. *Frontiers in Plant Science*. 2021;12:739896. DOI: 10.3389/fpls.2021.739896

PFAF (Plants For A Future). *Sesamum indicum* L.: [website]. Available from: https://pfaf.org/user/Plant.aspx?LatinName=Sesamum+indicum [accessed Sep. 12, 2024].

Yousefzadeh M., Ehsanzadeh P. Photosynthetic and antioxidative upregulation in drought-stressed sesame (*Sesamum indicum* L.) subjected to foliar-applied salicylic acid. *Photosynthetica*. 2017;55(4):611-622. DOI: 10.1007/s11099-017-0673-8

Информация об авторах

Ербол Бакирович Пирназаров, базовый докторант, преподаватель, Чирчикский государственный педагогический университет, 111720 Узбекистан, Чирчик, ул. Амира Темура, 104, e.pirnazarov@cspu.uz, https://orcid.org/0009-0003-8076-6945

Бахтиёр Хушбакович Аманов, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой, Чирчикский государственный педагогический университет, 111720 Узбекистан, Чирчик, ул. Амира Темура, 104, amanov.81@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-2215-0515

Information about the authors

Erbol B. Pirnazarov, Basic Doctoral Student, Lecturer, Chirchik State Pedagogical University, 104 Amir Temur St., Chirchik 111720, Uzbekistan, e.pirnazarov@cspu.uz, https://orcid.org/0009-0003-8076-6945

Bakhtiyar Kh. Amanov, Dr. Sci. (Biology), Professor, Head of a Department, Chirchik State Pedagogical University, 104 Amir Temur St., Chirchik 111720, Uzbekistan, amanov.81@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-2215-0515

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 27.01.2026; одобрена после рецензирования 26.03.2026; принята к публикации 24.04.2026.
The article was submitted on 27.01.2026; approved after reviewing on 26.03.2026; accepted for publication on 24.04.2026.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 365.656:581.143.6:635.656
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o19

(cc) BY

Регенерация растений овощного гороха в культуре *in vitro*

О. В. Путина[1], Р. С. Рахмангулов[2], Н. В. Поливара[1], Н. Н. Коваленко[1], Ю. В. Ухатова[2], Е. К. Хлесткина[2]

[1] Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Крымская опытно-селекционная станция – филиал ВИР, Крымск, Россия

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

Автор, ответственный за переписку: Ольга Владимировна Путина, olga-rhji@mail.ru

Актуальность. Регенерация гороха (*Pisum sativum* L.) через индукцию органогенеза в каллусной ткани – один из основных этапов создания трансформированных линий. В этой связи цель наших исследований заключалась в разработке протокола получения растений-регенерантов овощного гороха различных морфотипов через культуру тканей посредством инициации органогенеза.
Материалы и методы. Объектами исследования были овощные сорта гороха ‘Парус’ (к-9350) и ‘Красавчик’ (к-9449). На этапе введения в асептические условия при обработке набухших и сухих семян оценивали три стерилизующих агента. Через девять суток после посадки семян на питательную среду проростки разделяли на верхушечную почку, следующий за ней узел без листового аппарата и семядольный узел. Полученные экспланты переносили на четыре варианта питательных сред индукции каллуса. Для инициации морфогенеза тестировали три модификации сред. Сформированные побеги пересаживали на среды, содержащие ½ солей МС с добавлением 2 и 4 мг/л ИМК.
Результаты. Оптимальное соотношение всхожих семян к неинфицированным эксплантам получено при обработке сухих семян 1-процентным раствором NaOCl. Образование каллуса зафиксировано у всех типов эксплантов на всех вариантах сред. Изучение влияния гормонов роста на побегообразование каллусных агрегатов показало, что повышение концентрации цитокинина приводит к увеличению числа каллусов, образующих побеги, и количества побегов.
Заключение. Разработан протокол получения растений-регенерантов через культуру тканей посредством инициации органогенеза. Для индукции каллусной ткани питательные среды МСК2 (НУК 5 мг/л) и МСК3 (ИМК 6 мг/л и БАП 1 мг/л) рекомендованы как наиболее органогенные. Оптимальной средой для образования побегов является МСП2 (БАП 2,5 мг/л и ИМК 0,5 мг/л). Варианты сред для формирования корней имеют схожую положительную эффективность. Способность к регенерации в культуре тканей у сортов ‘Парус’ и ‘Красавчик’ была сопоставима.

Ключевые слова: овощной горох, стерилизация семян, каллус, органогенез

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ № 21-66-00012 «Создание с использованием генетических технологий и изучение новых линий растений, адаптированных к меняющимся условиям окружающей среды, обладающих повышенной продуктивностью и диетической ценностью».

Для цитирования: Путина О.В., Рахмангулов Р.С., Поливара Н.В., Коваленко Н.Н., Ухатова Ю.В., Хлесткина Е.К. Регенерация растений овощного гороха в культуре *in vitro*. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(2):92-104. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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.

© Путина О.В., Рахмангулов Р.С., Поливара Н.В., Коваленко Н.Н., Ухатова Ю.В., Хлесткина Е.К., 2026

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o19

In vitro regeneration of vegetable pea plants

Olga V. Putina[1], Ruslan S. Rakhmangulov[2], Nadezhda V. Polivara[1], Natalya N. Kovalenko[1], Yulia V. Ukhatova[2], Elena K. Khlestkina[2]

[1] *N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Krymsk Experiment Breeding Station – branch of VIR, Krymsk, Russia*
[2] *N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia*

Corresponding author: Olga V. Putina, olga-rhji@mail.ru

Background. The objective of our research was to obtain regenerated plants of vegetable pea through tissue culture by initiating organogenesis.
Materials and methods. Two vegetable pea cultivars served as the research material. Three sterilizing agents were evaluated when processing dry and swollen seeds. The explants were the apical bud, the next node without the leaf apparatus, and the cotyledon node. Four variants of callus induction media were studied, three variants for shoot formation, and two for rhizogenesis.
Results. Callus formation was recorded for all types of explants on all variants of media. The study of the effect of phytohormones on the shoot formation in callus aggregates showed that an increase in the concentration of cytokinin leads to an increase in the number of shoot-forming calli and the number of shoots.
Conclusions. Dry seeds should be used when cultivating pea plants with wrinkled seeds *in vitro*, with 1% NaOCl solution as a sterilizing agent. For callus tissue production, it is recommended to use the second (NAA, 5 mg/L) or third (IBK, 6 mg/L, and 6-BAP, 1 mg/L) variants of MSC. MSS2 (6-BAP, 2.5 mg/L, and IBC, 0.5 mg/L) proved to be the optimal shoot induction environment. The media variants for rhizogenesis induction had similar effectiveness.

Keywords: vegetable pea, seed sterilization, callus, organogenesis

Acknowledgments: the work was supported financially by the Russian Science Foundation under Project No. 21-66-00012 "Genetic technologies-based development and assessement of novel lines of crop plants, adapted to the changing environment and having increased productivity and dietary value".

For citation: Putina O.V., Rakhmangulov R.S., Polivara N.V., Kovalenko N.N., Ukhatova Yu.V., Khlestkina E.K. *In vitro* regeneration of vegetable pea plants. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding.* 2026;187(2):92-104. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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

Овощной горох (*Pisum sativum* L.) – высокопитательная зернобобовая культура (Kumari, Deka, 2021). Значительное содержание в семенах общего протеина с перевариваемостью *in vitro* более 80%, большого числа незаменимых аминокислот в белковых фракциях, высокоамилозного крахмала, витаминов, макро- и микроэлементов позволяет отнести горох к функциональным продуктам (Wu, et al., 2023). Повышение питательной ценности овощного гороха – это одна из основных задач селекции.

Применение современных генетических и биотехнологических методов селекции повышает эффективность и скорость создания новых генотипов растений с улучшенными свойствами. В последнее время наиболее распространенный способ трансформации растений – редактирование генома с использованием системы CRISPR/Cas9 (Khlestkina, Shumny, 2016; Wada et al., 2020; Gan, Ling, 2022). Метод основан на индукции сайт-специфичного расщепления двух цепей молекулы ДНК реципиента с ее последующей естественной репарацией (Jinek et al., 2012). Для доставки плазмидной конструкции непосредственно в клетки растений часто применяют высоковирулентные штаммы *Agrobacterium tumefaciens* или бомбардировку микрочастицами (Kuluev et al., 2019; Ukhatova et al., 2023). Трансформируют различные типы эксплантов, из которых получают нулевые трансформанты с помощью прямого органогенеза (Li et al., 2023) или опосредовано, через культуру тканей (Bhowmik et al., 2023). На основе растений-регенерантов создают генно-редактированные линии со стабильной целевой мутацией, передающейся следующим поколениям, и отсутствием чужеродных генов.

Получение трансформированных растений через культуру тканей посредством инициации органогенеза и соматического эмбриогенеза применяют при трансформации и зернобобовых культур (Finer, 2016; Song et al., 2020; Qi et al., 2023), в том числе гороха (Kaur et al., 2022; Bhowmik et al., 2023; Hodgins et al., 2024). Оптимизация этапов получения растений-регенерантов гороха через культуру тканей в большинстве случаев ведется с использованием кормовых, зимующих и полевых сортов. Эффективность процесса зависит от генотипа, типа экспланта и состава питательных сред. В данных экспериментах (Kunakh et al., 1984; Nadolska-Orczyk et al., 1994; El Sayed H., El Sayed A., 2011; Türkoğlu et al., 2023) инициированный каллус часто имел низкую морфогенную способность, вплоть до полного отсутствия. Кроме того, полученные побеги не всегда образовывали полноценную корневую систему, что значительно снижает вероятность получения регенерантов. Таким образом, перед проведением трансформации важно разработать протокол получения растений-регенерантов в культуре *in vitro*.

Цель наших исследований заключалась в разработке протокола получения растений-регенерантов овощного гороха через культуру тканей посредством инициации органогенеза. В связи с этим решались следующие задачи: проводилось сравнение эффективности стерилизации семян в сухом виде и после их набухания; оценивалась результативность трех стерилизующих агентов («Белизны», «Велтолена», «Перекиси водорода»); выявлялся тип экспланта, образующий каллус; определялся состав питательных сред для получения калллуса, побегов и корней; велась оценка регенерационной способности генотипов гороха.

Материалы и методы

Объектами выбраны два коммерческих сорта овощного гороха безлисточкового (‘Парус’, к-9350) и обычного (‘Красавчик’, к-9449) морфотипов с зелеными морщинистыми (мозговыми) семенами.

Ввод овощных сортов гороха в культуру *in vitro* и последующие пассажи эксплантов, каллусов, а также побегов проводили в условиях ламинарного бокса LAMSYSTEMS Neoteric (Россия). В период культивирования и адаптации растений-регенерантов к нестерильным условиям среды температура воздуха на фитоплощадке поддерживалась на уровне 22–26°С, освещенность составляла 5 тыс. лк, продолжительность светового дня – 16 часов, темновая фаза – 8 часов.

Оценивали эффективность обеззараживания семян в сухом виде и после их предварительного замачивания в течение суток (рис. 1). В качестве основных стерилизующих агентов использовали растворы «Белизны» (гипохлорит натрия, 1%, АО «Каустик»), «Велтолена» (клатрат четвертичного аммониевого соединения с карбамидом, 0,5%, ООО «НПО «ВЕЛТ») и «Перекиси водорода» (H_2O_2, 3%, АО «САМАРАМЕДПРОМ»).

Схема опыта по оценке эффективности обеззараживания семян овощного гороха представлена в таблице 1.

(1) (2)

Рис. 1. Семена овощного гороха сорта ‘Красавчик’: сухие (1) и через сутки после набухания (2)
Fig. 1. Seeds of the vegetable pea cv. ‘Krasavchik’: dry (1), and one day after swelling (2)

Таблица 1. Варианты опыта по оценке эффективности стерилизации семян гороха
Table 1. Variants of the experiment to assess the effectiveness of pea seed sterilization

Фактор 1 (сорт)	Фактор 2 (состояние семян)	Фактор 3 (стерилизующий агент)
'Парус' (120*)	Сухие (60)	«Белизна» (20)
		«Велтолен» (20)
		«Перекись водорода» (20)
	Набухшие (60)	«Белизна» (20)
		«Велтолен» (20)
		«Перекись водорода» (20)
'Красавчик' (120)	сухие (60)	«Белизна» (20)
		«Велтолен» (20)
		«Перекись водорода» (20)
	Набухшие (60)	«Белизна» (20)
		«Велтолен» (20)
		«Перекись водорода» (20)

Примечание: * – в скобках указано число семян каждого варианта опыта, шт.
Note: * – parenthesized is the number of seeds for each variant of the experiment, pcs.

Повторность опыта была двукратной. Всего в культуру *in vitro* введено 240 шт. семян.

Семена высаживали в стеклянные пробирки, заполненные 8 мл питательной среды (табл. 2). На десятый день после ввода в культуру учитывали количество инфицированных семян, число проростков выше 1,5 см, высоту побегов и длину корней.

Обеззараживание семян проводили по следующему протоколу:

- обработка семян поверхностно-активными веществами – 15 мин;
- промывание дистиллированной водой – 3 раза по 5 мин;
- обработка 96-процентным этанолом – 1 мин;
- в условиях ламинарного бокса обработка стерилизующими агентами сухих и набухших семян – 3 раза по 5 мин;
- промывание дистиллированной автоклавированной водой – 3 раза по 5 мин.

Проростки (по 8 шт. каждого сорта гороха) разделяли на три типа эксплантов (верхушечную почку, следующий за ней узел без листа и прилистников, семядольный узел) для их оценки по способности инициировать каллусную ткань (рис. 2). Затем 48 эксплантов по 16 шт. каждого типа переносили на среды для индукции каллуса (см. табл. 2). Контрольный вариант (МС) не содержал гормоны. Экспериментальные питательные среды были дополнены МСК1 – 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислотой (2,4-Д, 2 мг/л), МСК2 – альфа-нафтилуксусной кислотой (НУК, 5 мг/л), МСК3 – индолил-3-масляной кислотой (ИМК, 6 мг/л) в сочетании с 6-бензиламинопурином (БАП, 1 мг/л). После 30 дней культивирования оценивали число и процент эксплантов, образовавших каллусную ткань.

В процессе культивирования некоторые экспланты и каллусы погибали. Полученный каллус пересаживали на среду МС с добавлением ИМК (6 мг/л) для его поддержания и роста. Через 35 дней увеличившиеся в размере каллусные структуры делили на сегменты 1,0–1,5 см и переносили на три варианта сред для индукции побегообразования (см. табл. 2). Общее число каллусных агрегатов в опыте составило 49 шт. Пассаж проводили через 45 дней, если закладки побеговых почек не наблюдали. При формировании побегов их отсаживали на среды для корнеобразования, а каллусы переносили на свежую среду (с тем же составом) для получения новых побегов. В период наблюдений учитывали число каллусов, образовавших побеги, общее число побегов и в пересчете на один каллус, а также количество нормально развитых побегов. Определяли процент каллусов, сформировавших побеги, и процент нормально развитых побегов.

Побеги высотой более 4 см переносили на питательные среды, содержащие ½ МС, сахарозы 3% и агара 0,7%, ИМК в концентрации 2,0 мг/л (МСР1) и 4,0 (МСР2), для начала образования корней.

Растения-регенеранты пересаживали в пластиковые контейнеры, наполненные предварительно пропаренной смесью торфа, земли и песка в соотношении 1 : 1 : 1. Первую неделю в период адаптации растения накрывали прозрачной крышкой, которую в дальнейшем убирали. Каждое растение подкармливали 20 мл среды МСР1 без сахарозы и агара.

На этапе оценки результатов опыта по установлению эффективности стерилизации семян для выявления значимых отличий между вариантами по параметрам «высота побега» и «длина корня» применяли t-test для неравных выборок с использованием программного обеспечения STATISTICA 10. Для установления наименьшей существенной разницы между вариантами опыта по параметрам «инфицировано семян» и «число проростков выше 1,5 см» проводили многофакторный дисперсионный анализ с применением критерия Фишера (Factorial ANOVA, Fisher's LSD test). Частотный анализ по параметрам, выявляющим тип экспланта, образующего каллус, и определяющим оптимальные среды для получения каллуса, побегов и корней, осуществляли в Microsoft Of-

Таблица 2. Варианты питательных сред для различных этапов культивирования
Table 2. Variants of nutrient media for different stages of cultivation

Этап культивирования	Питательная среда	
	Название	Состав*
Ввод в культуру *in vitro*		МС без витаминов, БАП 0,5 мг/л
Образование каллуса	МС	МС
	МСК1	МС, 2,4-Д 2 мг/л
	МСК2	МС, НУК 5 мг/л
	МСК3	МС, ИМК 6 мг/л и БАП 1 мг/л
Поддержание каллуса		МС, ИМК 6 мг/л
Побегообразование	МСП1	МС, БАП 1,0 мг/л и ИМК 0,5 мг/л
	МСП2	МС, БАП 2,5 мг/л и ИМК 0,5 мг/л
	МСП3	МС, БАП 5,0 мг/л и ИМК 0,5 мг/л
Образование корней	МСР1	½МС, ИМК 2,0 мг/л
	МСР2	½МС, ИМК 4,0 мг/л

Примечание: * – МС – минеральные соли (Murashige, Skoog, 1962), 0,1 мг/л тиамина, 0,5 пиридоксина, 0,5 никотиновой кислоты, 100 мг/л мезоинозита, 30 г/л сахарозы, 7 г/л агара; 2,4-Д – 2,4-дихлорфеноксиуксусная кислота; НУК – альфа-нафтилуксусная кислота; ИМК – индолил-3-масляная кислота; БАП – 6-бензиламинопурин

Note: * – MC consists of mineral salts (Murashige, Skoog, 1962), 0.1 mg/L of thiamine, 0.5 of pyridoxine, 0.5 of nicotinic acid, 100 mg/L of mesoinositol, 30 g/L of sucrose, and 7 g/L of agar; 2,4-Д is 2,4-dichlorophenoxyacetic acid; НУК is alpha-naphthylacetic acid; ИМК is indolyl-3-butyric acid; БАП is 6-benzylaminopurine

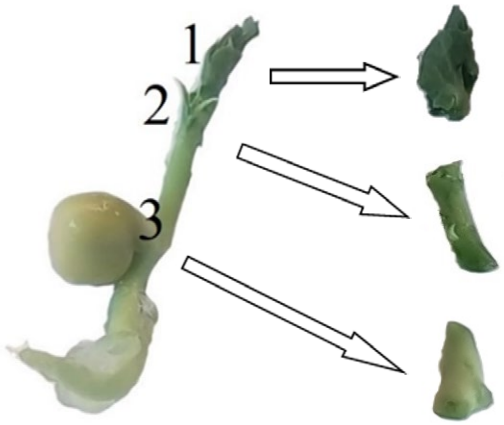


Рис. 2. Типы эксплантов гороха, используемые для индукции каллуса: 1 – верхушечная почка; **2** – узел без листа и прилистников; **3** – семядольный узел

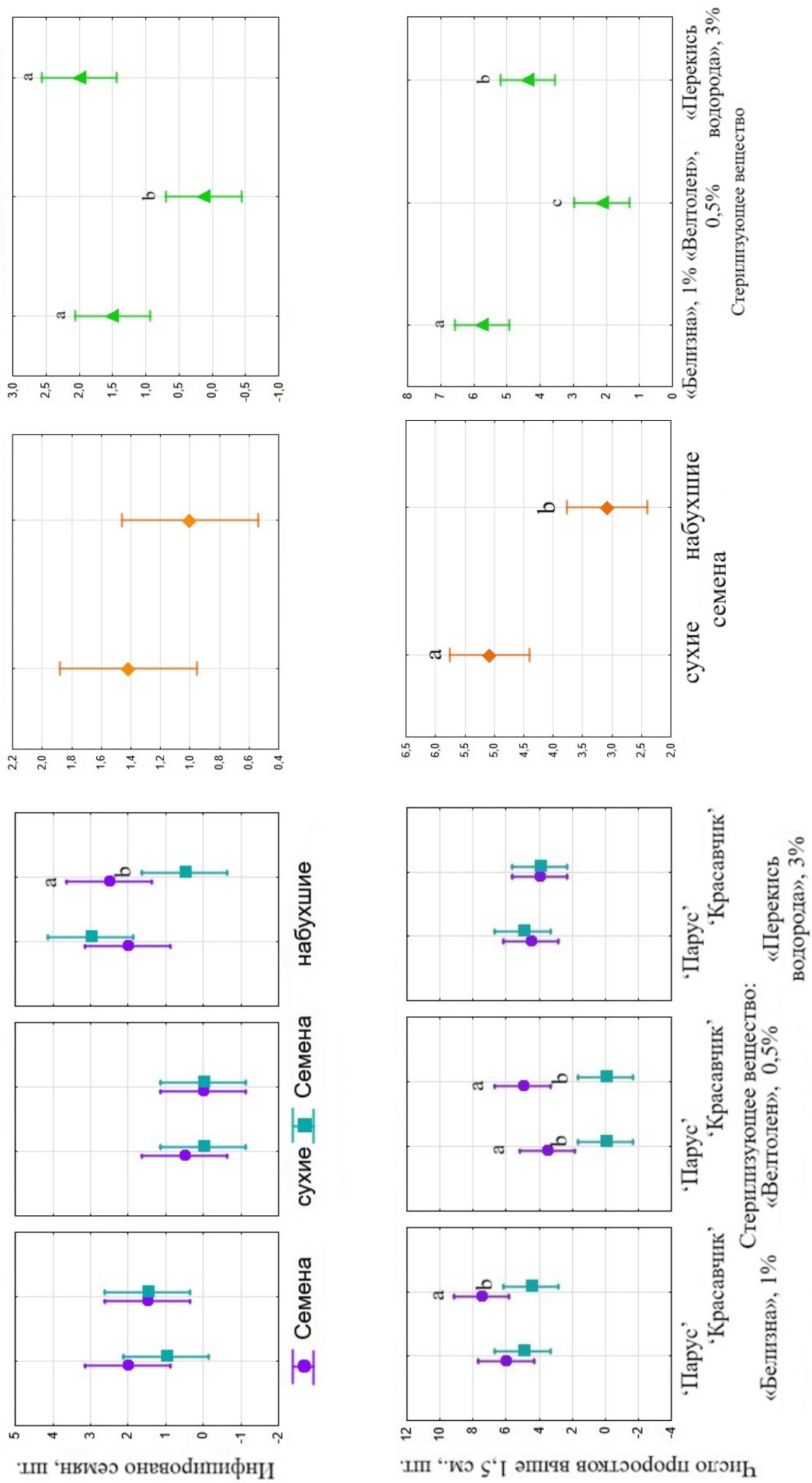
Fig. 2. Types of pea explants used for callus induction: 1 – apical bud; **2** – node without a leaf or stipules; **3** – cotyledon node

fice Excel. На графиках и в таблицах указаны средние значения признака с доверительным интервалом 0,95.

Результаты и обсуждение

Для оценки эффективности вариантов стерилизации семян овощного гороха на десятый день после ввода в культуру *in vitro* проводили учеты и измерение биометрических параметров (рис. 3, табл. 3). Анализировали по 120 шт. семян сортов ‘Парус’ (к-9350) и ‘Красавчик’ (к-9449). Число инфицированных семян между сортами значимо не отличалось, как и между вариантами при обеззараживании сухих семян и после их набухания. Сравнение влияния дезинфицирующих средств показало, что оно значимо выше при обработке семян раствором «Велтолена». Между средними значениями числа инфицированных эксплантов при обработке семян «Белизной» и «Перекисью водорода» значимых отличий не установлено (см. рис. 3).

Число проростков выше 1,5 см оказалось больше у сорта ‘Парус’ безлисточкового морфотипа. Среднее значение этого признака при обеззараживании сухих семян было значимо выше, чем в варианте с набухшими семенами: разница составила 2,1 шт. Степень воздействия



a, b, c – значимые отличия между вариантами по результатам дисперсионного анализа (Factorial ANOVA) с критерием Фишера (LSD test), при $p < 0,05$ /
a, b, c – significant differences between variants based on the results of Factorial ANOVA with Fisher's LSD test, $p < 0.05$

Рис. 3. Оценка эффективности вариантов стерилизации семян гороха в зависимости от их состояния (сухие, набухшие), сорта ('Парус', 'Красавчик') и стерилизующего агента («Белизна», «Велтолен», «Перекись водорода»)

Fig. 3. Assessment of the effectiveness of sterilization options for pea seeds depending on their condition (dry or swollen), the cultivar ('Parus' or 'Krasavchik'), and the sterilizing agent (Belizna, Veltolen, or hydrogen peroxide)

Таблица 3. Значения биометрических параметров проростков овощного гороха в зависимости от вариантов опыта по оценке эффективности стерилизации семян

Table 3. The values of biometric parameters in vegetable pea plantlets depending on the experiment's options for assessing the effectiveness of seed sterilization

Параметр	Сорт		Семена		Стерилизующее средство		
	'Парус'	'Красавчик'	сухие	набухшие	«Белизна»	«Велтолен»	«Перекись водорода»
Высота побега, см.	3,5 ± 0,3	3,8 ± 0,4	3,6 ± 0,3	3,7 ± 0,5	**4,1 ± 0,4**[a]	2,7 ± 0,5[b]	**3,7 ± 0,4**[a]
Длина корня, см.	**4,0 ± 0,6**[a]	3,2 ± 0,5[b]	3,5 ± 0,5	3,8 ± 0,5	**4,2 ± 0,5**[a]	0,9 ± 0,4[b]	**4,3 ± 0,4**[a]

Примечание: [a, b] – значимые отличия между вариантами по результатам t-test для неравных выборок, при $p < 0,05$

Note: [a, b] – significant differences between variants based on the *t*-test for independent samples, $p < 0.05$

дезинфицирующих средств также различалась. Максимальное число проростков (5,6 шт.) получено при использовании раствора «Белизны», минимальное (2,1) – «Велтолена». Отдельно следует отметить, что в варианте стерилизации набухших семян «Велтоленом» (0,5% по действующему веществу [д. в.]) инфицирования и прорастания семян не наблюдалось.

Средние значения биометрических параметров (высота побега и длина корня), характеризующих развитие проростков изучаемых сортов гороха при различных вариантах стерилизации семян, представлены в таблице 3. Высота побегов у сортов 'Парус' и 'Красавчик' значимо не отличалась. Не наблюдалось разницы по этому признаку и между семенами, обработанными в сухом и набухшем виде. На высоту проростков оказывали влияние применяемые обеззараживающие средства (см. табл. 3). Использование «Велтолена» (0,5%) замедляло рост побегов. Средние значения этого признака были значимо выше при применении «Белизны» (1%) и «Перекиси водорода» (3%).

Длина корня была больше у растений сорта 'Парус' (см. табл. 3). Средние значения этого признака в опыте с сухими и набухшими семенами не различались. Дезинфицирующие средства по-разному влияли на рост корневой системы. Применение раствора «Велтолена» ингибировало развитие корней. Использование «Белизны» и «Перекиси водорода» в качестве стерилизующих агентов оказывало более благоприятное воздействие, длина корней была значимо больше (см. табл. 3).

Наибольший дезинфицирующий эффект установлен при применении раствора «Велтолена» (0,5%). Однако отмечено, что данный препарат значимо снижает число проростков и ингибирует их рост и развитие. Низкий уровень инфицирования семян и высокий по числу хорошо развитых проростков установлены при использовании в качестве стерилизующего агента раствора «Белизны» (1%).

После оценки эффективности различных вариантов стерилизации материала полученные здоровые и хорошо развитые побеги были разделены на три типа эксплантов (см. рис. 2), которые перенесли на четыре разные среды для индукции каллуса (см. табл. 2). Через 30 дней после посадки оценивали число и процент эксплантов, образовавших каллусную ткань. Между сортами 'Парус' и 'Красавчик' по данным параметрам разницы не выявлено. Образование каллуса отмечалось для всех типов эксплантов (верхушечная почка, узел без листа и прилистников, семядольный узел), наибольшее число получено из верхушечной почки. Варианты питательных сред также отличались по эффективности индукции каллусной ткани (табл. 4). Максимальный процент эксплантов, образовавших каллус, зафиксирован на среде МСК1 с применением ауксина 2,4-Д в концентрации 2 мг/л. Однако в дальнейшем из этих каллусов не наблюдалось индукции побегов. Отмечено, что при применении ауксина 2,4-Д образуется светло-желтый каллус. При добавлении в питательную среду гормона НУК в концентрации 5 мг/л формируется зеленый каллус и корни. Исполь-

Таблица 4. Индукция каллусогенеза в зависимости от сорта гороха, типа экспланта и гормонального состава питательной среды

Table 4. Induction of callus formation depending on the pea cultivar, type of the explant, and hormone composition of the nutrient medium

Параметр	Сорт		Тип экспланта*			Питательные среды индукции каллуса**			
	'Парус'	'Красавчик'	1	2	3	МС	МСК1	МСК2	МСК3
Число эксплантов, шт.	24	24	16	16	16	12	12	12	12
Число эксплантов, образовавших каллус, шт.	13	13	**10**	9	7	1	**10**	8	7
Процент образования каллуса, %	54,2	54,2	**62,5**	56,3	43,8	8,3	**83,3**	66,7	58,3

Примечание: * – типы экспланта: 1 – верхушечная почка, 2 – следующий за ней узел без листа и прилистников, 3 – семядольный узел; ** – МС, МСК1, МСК2, МСК3 – см. табл. 2

Note: * – explant types: 1 – apical bud, 2 – next node without a leaf or stipules, and 3 – cotyledon node; ** – МС, МСК1, МСК2, МСК3 – see Table 2

зование ИМК в концентрации 6 мг/л в сочетании с БАП (1 мг/л) способствует формированию темно-зеленого каллуса и побегов. Данные наблюдения согласуются с ранее описанными при изучении эффективности каллусогенеза и органогенеза гороха посевного (El Sayed H., El Sayed A., 2011).

Полученный каллус пересаживали на питательную среду для его поддержания и роста на 35 дней (см. табл. 2). Побеги и корни удаляли без учета, предполагая, что они развились из апикальной или пазушной меристемы (Jackson, Hobbs, 1990; El Sayed H., El Sayed A., 2011). Далее каллусные агрегаты размером 1,0–1,5 см переносили на три различные среды для побегообразования (табл. 2, 5).

Хорошо развитые 3 побега (2 – сорта ‘Парус’, 1 – ‘Красавчик’) были пересажены на среду МСР1, содержащую ИМК в концентрации 2 мг/л, и 4 побега (2 – ‘Парус’, 2 – ‘Красавчик’) – на МСР2 (ИМК 4 мг/л). При использовании питательной среды МСР1 для индукции ризогенеза получено одно растение-регенерант, на варианте МСР2 – два. Далее эти три растения были переведены в нестерильные условия.

Для культуры овощного гороха с мозговой (морщинистой) поверхностью семян впервые разработан протокол получения растений-регенерантов через культуру тканей, начиная с этапа стерилизации семян и заканчивая пересадкой регенерировавших растений в почвосмесь.

Таблица 5. Индукция побегообразования в зависимости от генотипа и гормонального состава питательной среды

Table 5. Induction of shoot formation depending on the genotype and hormone composition of the nutrient medium

Параметр	Сорт		Питательные среды индукции побегов*		
	‘Парус’	‘Красавчик’	МСП1	МСП2	МСП3
Посажено каллусов, шт.	28	21	16	18	15
Число каллусов, образовавших побеги, шт.	**6**	2	2	3	3
Процент каллусов, образовавших побеги от общего их числа, %	**21,4**	9,5	12,5	16,7	**20,0**
Число побегов, шт.	**17**	10	2	6	**19**
Число побегов на один каллус, образовавший побеги, шт.	2,8	**5,0**	1,0	2,0	**6,3**
Число побегов высотой более 4 см, шт.	4	3	2	3	2
Процент нормально развитых побегов от общего их числа, %	23,5	30,0	**100,0**	50,0	10,5

Примечание: * – МСП1 (БАП 1,0 мг/л и ИМК 0,5 мг/л); МСП2 (БАП 2,5 мг/л и ИМК 0,5 мг/л); МСП3 (БАП 5,0 мг/л и ИМК 0,5 мг/л)

Note: * – MSS1 (BAP 1.0 mg/L, and IBA 0.5 mg/L); MSS2 (BAP 2.5 mg/L, and IBA 0.5 mg/L); MSS3 (BAP 5.0 mg/L, and IBA 0.5 mg/L)

Каллусные ткани двух изучаемых генотипов проявили способность к органогенезу. Число каллусов, образовавших побеги, их процент и общее число были выше у сорта ‘Парус’ (безлисточкового морфотипа), тогда как у сорта ‘Красавчик’ (обычного морфотипа) сформировалось большее число побегов из одного каллуса. Между сортами не наблюдалось значительной разницы по числу и проценту нормально развитых побегов (см. табл. 5). Индукция побегов зависела от концентрации гормонов в питательной среде. Максимальное число и процент каллусов с зафиксированным побегообразованием (20%) отмечены на среде МСП3. Общее число побегов и их количество в пересчете на один каллус увеличивались с ростом концентрации БАП, достигая максимальных значений (19 шт. и 6,3 шт. соответственно) на третьем варианте среды (см. табл. 5). Однако не все образовавшиеся побеги развивались: некоторые останавливались в росте, имели аномальное строение или были витрифицированными (гипергидротированными, стекловидными). Наибольшее число нормально развитых побегов получено на среде МСП2 (БАП 2,5 мг/л и ИМК 0,5 мг/л). Процент нормально развитых побегов от общего их числа уменьшался (от 100% до 10,5%) с увеличением концентрации цитокинина в среде (см. табл. 5).

Разработок протокола стерилизации семян гороха с морщинистой (мозговой) поверхностью практически не встречается в научных исследованиях. Для образцов с округлыми семенами (с гладкой поверхностью) показана высокая (до 90%) эффективность использования для обеззараживания хлорсодержащих препаратов (Sashchenko, Podvigina, 2014). Предложенный в разделе «Материалы и методы» протокол стерилизации сухих семян овощного гороха с мозговой поверхностью с применением раствора «Белизны» (1% по д. в.) позволяет получить 67,5% здоровых проростков от общего числа семян, введенных в культуру *in vitro*. От здоровых и хорошо развитых проростков гороха были отделены: верхушечная почка, следующий за ней узел без листа и прилистников, семядольный узел – для оценки способности эксплантов изучаемых генотипов индуцировать каллусогенез.

Частота образования первичного каллуса гороха кормового и зимующего в зависимости от сорта составляла 60–100% (Kunakh et al., 1984; Türkoğlu et al., 2023). В исследовании (Soboleva, 2016) высокий процент (80–95%) индукции каллуса наблюдался в равной степени у двух сортов и двух линий посевного гороха с округлыми семенами. Генотипы отличались по типу роста стебля (детерминантные и индетерминантные) и строению листового

аппарата (безлисточкового морфотипа или с ярусной гетероморфностью, с обычными прилистниками или редуцированными в зоне плодоношения). В проведенном нами эксперименте также не наблюдалось различий между сортами овощного гороха с мозговой поверхностью семян обычного морфотипа ('Красавчик') и безлисточкового ('Парус') по способности инициировать первичный каллус (с частотой 54,2%).

Индукция каллусной ткани возможна из различных типов эксплантов: зародышевой почки, семядолей, семядольного узла, гипокотиля, верхушки побега, узла (Jackson, Hobbs, 1990; Nadolska-Orczyk et al., 1994; El Sayed H., El Sayed A., 2011; Türkoğlu et al., 2023). Сегменты стебля (77,6% в среднем), листа (72,6%) и корня (70,3%) не имели значимых отличий по частоте каллусообразования (Kunakh et al., 1984). В нашем исследовании каллусогенез был зафиксирован для всех типов эксплантов. Частота индукции каллуса зависела от типа экспланта и убывала в следующем направлении: верхушечная почка (62,5%) → узел без листа и прилистников (56,3%) → семядольный узел (43,8%).

Состав питательной среды оказывает влияние на каллусогенез эксплантов гороха. При использовании пяти вариантов сред максимальный процент эксплантов, образующих каллусную ткань (в среднем 96%), зафиксирован на средах Мурасиге – Скуга и B-5 при добавлении 2,4-Д (2–10 мг/л). Частота каллусогенеза на других средах не превышала 43% (Kunakh et al., 1984). В одной из работ (El Sayed H., El Sayed A., 2011) для индукции каллуса использовали среды Мурасиге – Скуга, SH-M и Хеллера с различными концентрациями гормонов. Универсальной для всех типов эксплантов была среда Мурасиге – Скуга в сочетании с кинетином (0,2 мг/л) и 2,4-Д (2,0 мг/л). Полученные нами данные согласуются с представленными в литературе: максимальный процент каллусогенеза (83,5%) достигнут при добавлении в среду МС ауксина 2,4-Д (2 мг/л).

Образование почек из каллусной ткани и дальнейшее развитие побегов наблюдается в тех случаях, когда для получения первичного каллуса экспланты культивировались на средах без добавления 2,4-Д, либо после проведения нескольких пассажей на обедненных средах без данного гормона (Kunakh et al., 1984), либо после пересадки на среду Мурасиге – Скуга с добавлением БАП (2,0 мг/л) и ИУК (0,2 мг/л) (El Sayed H., El Sayed A., 2011). В связи с этим мы пересаживали каллус на среду, содержащую ИМК (6 мг/л). Однако индуцировать органогенез из каллусных тканей, изначально полученных на среде с 2,4-Д, не удалось. Побеги формировались из каллуса, первоначально образованного при добавлении в среду НУК (5 мг/л) или ИМК (6 мг/л) в сочетании с БАП (1 мг/л).

Органогенная реакция каллусной ткани гороха также зависит от генотипа и типа экспланта. Индукция и рост побегов наблюдались у одной линии в культурах тканей листового, стеблевого и корневого происхождения, а также у одного сорта при использовании сегментов листа и корня. Из длительно пассируемой каллусной ткани (более трех лет) других трех генотипов, полученной из участков стебля, листа и корня, при пересадке на 60 различных сред побегов не образовалось (Kunakh et al., 1984). Другие исследователи (Jackson, Hobbs, 1990; Nadolska-Orczyk et al., 1994) достигли органогенеза каллусных агрегатов, инициированных из незрелых семядолей и семядольного узла, с частотой 70–100% и числом побегов на эксплант 3,3–9,9 шт. в зависимости от генотипа. Каллус, индуцированный из зародышевой почки (плюмулы) и незрелого листа, образовывал побеги реже (0–56% и 24–28%, соответственно) и в меньшем количестве (0,0–0,6 шт. и 0,2–0,3 шт.). Высокая частота (до 100%) индукции органогенеза отмечена при использовании узла стебля в качестве экспланта (Tzitzikas et al., 2004; El Sayed H., El Sayed A., 2011). В эксперименте (El Sayed H., El Sayed A., 2011) из каллусной ткани, полученной из семядолей, междоузлий, сегментов листа и корня, побеговые почки не формировались.

В наших опытах оба генотипа овощного гороха формировали побеги в культуре тканей. Число побегов на одном каллусе у сорта 'Парус' было 2,8 шт., у сорта 'Красавчик' – 5,0 шт. Высокий органогенный ответ каллуса отмечают, когда он образуется из эксплантов, содержащих меристематические ткани (Jackson, Hobbs, 1990; Tzitzikas et al., 2004; El Sayed H., El Sayed A., 2011; Soboleva, 2016). В соответствии с этим нами были выбраны следующие типы эксплантов: верхушечная почка, узел с удаленным листом и прилистниками и семядольный узел. Органогенный ответ каллусных агрегатов получен у сорта 'Красавчик' в случае их происхождения из верхушечной почки и семядольного узла, у сорта 'Парус' – из всех типов эксплантов.

Значительное влияние на способность каллусных тканей формировать побеги оказывает состав питательной среды. В исследовании (El Sayed H., El Sayed A., 2011) наибольший процент каллусов с побегами (89%) зафиксирован при добавлении в среду БАП (2,0 мг/л) и НУК (2,0 мг/л). Увеличение концентрации цитокинина до 5 мг/л вызывало ингибирование побегообразования (27%). Изменение концентрации НУК (от 0,0 мг/л до 5,0 мг/л) в присутствии БАП не оказывало значительного влияния на процесс органогенеза. Добавление в среду только ауксина инициировало рост корней, а не побегов. В другом исследовании (Nadolska-Orczyk et al., 1994) частота образования побегов достигала 86% при культивировании каллусных тканей на среде, содержащей высокую концентрацию ауксина (ИМК 5 мг/л) и низкую цитокинина (БАП 0,5 мг/л). Побегообразование с частотой до 100% получено на среде с добавлением БАП (1,0 мг/л), однако повышение концентрации гормона до 10 мг/л приводило к аномалиям развития (Jackson, Hobbs, 1990).

Выявленные в нашей работе закономерности индукции побегообразования несколько отличаются от литературных данных. Отмечено следующее: при повышении концентрации БАП (от 1,0 до 5,0 мг/л) увеличивается процент каллусов, образующих побеги (до 20%), растет общее число побегов и их количество на одном каллусе (до 6,3 шт.), однако снижается процент нормально развитых побегов (от 100% до 10,5%). Оптимальная среда для получения побегов – МСП2 (БАП 2,5 мг/л и ИМК 0,5 мг/л). При ее использовании 16,7% каллусов образуют побеги (по 2,0 шт.), из которых 50,0% – без аномалий в развитии.

Регенерированные побеги, полученные при длительном культивировании каллусных тканей в исследовании, описанном ранее (Kunakh et al., 1984), не образовывали корней. Индуцировать ризогенез удалось в других экспериментах. Частота формирования корней составила 15–39% в зависимости от генотипа при культивировании побегов на среде ½ Мурасиге – Скуга без использования гормонов либо с ИУК (0,1 мг/л) (Nadolska-Orczyk et al., 1994). Отмечено влияние состава питательной среды на процесс корнеобразования (Tzitzikas et al., 2004). При добавлении в среду B5 гормонов ИМК, НУК, ИУК

в концентрации 0,5 мг/л частота ризогенеза составила 50, 24 и 9% соответственно. В исследовании прошлых лет (Jackson, Hobbs, 1990) способность образовывать корни была обусловлена гормональным составом среды, на которой получали побеги. Индукция корней у 90% побегов достигнута на среде ½ B5 с НУК (0,186 мг/л) для побегов, образованных на среде с содержанием БАП 1,0 мг/л. Побеги, сформированные при высоких концентрациях БАП (до 10 мг/л), имели аномальное развитие и после переноса на среду ризогенеза образовывали каллус, а не корневую систему.

В нашем эксперименте регенерированные побеги были перенесены на среду ½ МС с добавлением ИМК (2,0 мг/л или 4,0 мг/л). Процент индукции корней составил 33% и 50% соответственно. Ризогенез побегов сорта 'Парус' достиг 50%, сорта 'Красавчик' – 33%. Полученные регенеранты были пересажены в почвосмесь.

Исследование проводили на двух сортах овощного гороха с морщинистыми (мозговыми) семенами зеленой окраски – обычного ('Красавчик') и безлисточкового ('Парус') морфотипов. Генотипы показали схожую реакцию при культивировании. На этапе оценки эффективности стерилизации семян значимых отличий по числу инфицированных семян и высоте побегов не выявлено. Однако число проростков выше 1,5 см и более длинные корни наблюдались у сорта 'Парус'. Это может быть связано с энергией прорастания семян, их всхожестью и биологическими особенностями генотипа.

Каллусная ткань индуцирована из всех типов эксплантов с частотой 54,2%. После пересадки на среды побегообразования из 28 каллусов сорта 'Парус' на шести из них образовалось 17 побегов, четыре из которых не имели аномалий в развитии. Каллусы сорта 'Красавчик' были способны к органогенезу в меньшей степени. Формирование побегов наблюдалось на двух каллусах из 21. Всего получено 10 побегов, три из которых были хорошо развиты. Таким образом, независимо от числа органогенных каллусов, они регенерировали с сопоставимой частотой нормально развитые побеги ('Парус' – 23,5%, 'Красавчик' – 30,0). Индукция побегов достигнута из каллусных тканей всех типов эксплантов сорта 'Парус'. Каллусные агрегаты сорта 'Красавчик' образовывали побеги в случае их происхождения из верхушечной почки и семядольного узла. У сорта 'Парус' ризогенез отмечен у двух из четырех побегов, а у сорта 'Красавчик' – у одного из трех.

Проведенный эксперимент по регенерации овощного гороха посредством инициации органогенеза через культуру тканей продолжался 8 месяцев (с учетом наблюдений после перевода их в нестерильные условия). Его основные этапы и их продолжительность отражены в таблице 6. Изучаемые генотипы имели сопоставимую реакцию во всех опытах эксперимента. При вводе в культуру *in vitro* 240 семян овощного гороха из 48 эксплантов получено два растения-регенеранта сорта 'Парус' и один – сорта 'Красавчик'.

Таблица 6. Протокол для получения растений-регенерантов овощного гороха через культуру тканей
Table 6. Protocol for obtaining regenerated plants of vegetable peas through tissue culture

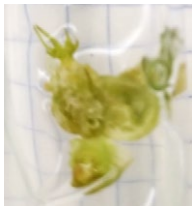
Этап эксперимента / рекомендуемый вариант	Продолжительность этапа	Общее число объектов наблюдения, шт.	Полученное число ожидаемых объектов, шт. (%)	Объект
Получение проростков	10 дней	240 семян	98 (41) проростков	
Сухие семена, «Белизна» (гипохлорит натрия, 1%)		40	27 (68)	
Индукция каллуса	30 дней	48 эксплантов	26 (54) каллусов	
МСК2		12	8 (67)	
Поддержание и рост каллусной ткани	35 дней	26 каллусов	—	

Таблица 6. Окончание
Table 6. The end

Этап эксперимента / рекомендуемый вариант	Продолжительность этапа	Общее число объектов наблюдения, шт.	Полученное число ожидаемых объектов, шт. (%)	Объект
Побегообразование	2–3 месяца	49 каллусных агрегатов	8 (16) каллусов с зафиксированным побегообразованием 7 (14) нормально развитых побегов от общего числа побегов	
МСП2		18	3 (17) 3 (50)	
Ризогенез	1–2 месяца	7 побегов	3 (43) растения-регенеранта	
МСР2		4	2 (50)	
Итого:	5–7 месяцев	240 семян	3 (1) растения-регенеранта	

Заключение

Разработан протокол получения растений-регенерантов овощного гороха через культуру тканей от этапа стерилизации семян до перевода регенерантов в нестерильные условия. Обеззараживание сухих семян овощного гороха рекомендуется проводить с использованием в качестве стерилизующего агента однопроцентного раствора гипохлорита натрия («Белизна»), что позволяет получить 67,5% неинфицированных проростков от общего числа семян, введенных в культуру *in vitro*. Для регенерации растений гороха через культуру тканей эксплантом нужно выбирать верхушку побега и переносить ее на среду индукции каллуса МСК2 (НУК 5 мг/л) или МСК3 (ИМК 6 мг/л в сочетании с БАП 1 мг/л). Пересадка каллусных агрегатов на питательную среду МСП2 (6-БАП 2,5 мг/л в сочетании с ИМК 0,5 мг/л) обеспечивает получение нормально развитых побегов, которые в дальнейшем способны формировать корневую систему. Экспериментальные среды ризогенеза (½ МС, ИМК 2,0 мг/л, и ½ МС, ИМК 4,0 мг/л) имеют схожую положительную эффективность. Разработанный протокол позволяет интенсифицировать процесс регенерации овощного гороха опосредовано, через культуру тканей. Регенерационная способность изучаемых генотипов овощного гороха с морщинистой поверхностью семян обычного ('Красавчик') и безлисточкового ('Парус') морфитипов сопоставима.

References / Литература

Bhowmik P., Yan W., Hodgins C., Polley B., Warkentin T., Nickerson M. et al. CRISPR/Cas9-mediated lipoxygenase gene-editing in yellow pea leads to major changes in fatty acid and flavor profiles. *Frontiers in Plant Science*. 2023;14:1246905. DOI: 10.3389/fpls.2023.1246905

El Sayed H., El Sayed A. Regeneration of callus and organogenesis from explants in *Pisum sativum* L. using various basal medium cultures. *Egyptian Journal of Experimental Biology*. 2011;7(1):143-151. URL: https://www.egyseb.net//?mno=186938 [дата обращения: 09.03.2024].

Finer J.J. Generation of transgenic soybean (*Glycine max*) via particle bombardment of embryogenic cultures. *Current Protocols in Plant Biology*. 2016;1(4):592-603. DOI: 10.1002/cppb.20039

Gan W.C., Ling A.P.K. CRISPR/Cas9 in plant biotechnology: applications and challenges. *BioTechnologia*. 2022;103(1):81-93. DOI: 10.5114/bta.2022.113919

Hodgins C.L., Salama E.M., Kumar R., Zhao Y., Roth S.A., Cheung I.Z. et al. Creating saponin-free yellow pea seeds by

CRISPR/Cas9-enabled mutagenesis on β-amyrin synthase. *Plant Direct*. 2024;8(1):e563. DOI: 10.1002/pld3.563

Jackson J.A., Hobbs S.L.A. Rapid multiple shoot production from cotyledonary node explants of pea (*Pisum sativum* L.). *In Vitro Cellular and Developmental Biology*. 1990;26(8):835-838. DOI: 10.1007/bf02623626

Jinek M., Chylinski K., Fonfara I., Hauer M., Doudna J.A., Charpentier E. A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity. *Science (New York)*. 2012;337(6096):816-821. DOI: 10.1126/science.1225829

Kaur R., Donoso T., Scheske C., Lefsrud M., Singh J. Highly efficient and reproducible genetic transformation in pea for targeted trait improvement. *ACS Agricultural Science and Technology*. 2022;2(4):780-787. DOI: 10.1021/acsagscitech.2c00084

Khlestkina E.K., Shumny V.K. Prospects for application of breakthrough technologies in breeding: the CRISPR/Cas9 system for plant genome editing. *Russian Journal of Genetics*. 2016;52(7):676-687. DOI: 10.1134/S102279541607005X

Kuluev B.R., Gumerova G.R., Mikhaylova E.V., Gerashchenkov G.A., Rozhnova N.A., Vershinina Z.R. et al. Delivery of CRISPR/Cas components into higher plant cells for genome editing. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2019;66(5):694-706. DOI: 10.1134/S102144371905011X

Kumari T., Deka S.C. Potential health benefits of garden pea seeds and pods: A review. *Legume science*. 2021;3(2):e82. DOI: 10.1002/leg3.82

Kunakh V.A., Voiltyuk L.I., Alkhimova E.G., Alpatova L.K. Callus tissue formation and induction of organogenesis in *Pisum sativum* L. (Polucheniye kallusnykh tkaney i induktsiya organogeneza u *Pisum sativum* L.). *Russian Journal of Plant Physiology*. 1984;31(3):542-548. [in Russian] (Кунах В.А., Войтюк Л.И., Алхимова Л.К., Алпатова Л.К. Получение каллусных тканей и индукция органогенеза у *Pisum sativum* L. *Физиология растений*. 1984;31(3):542-548).

Li G., Liu R., Xu R., Varshney R.K., Ding H., Li M. et al. Development of an *Agrobacterium*-mediated CRISPR/Cas9 system in pea (*Pisum sativum* L.). *The Crop Journal*. 2023;11(1):132-139. DOI: 10.1016/j.cj.2022.04.011

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

Nadolska-Orczyk A., Miłkowska L., Orczyk W. Two ways of plant regeneration from immature cotyledons of pea. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*. 1994;63(2):153-157. DOI: 10.5586/asbp.1994.020

Qi T., Tang T., Zhou Q., Yang W., Hassan M.J., Cheng B. et al. Optimization of protocols for the induction of callus and plant regeneration in white clover (*Trifolium repens* L.). *International Journal of Molecular Sciences*. 2023;24(14):11260. DOI: 10.3390/ijms241411260

Sashchenko M.N., Podvigina O.A. Peculiarities of pea plant development during microclonal propagation *in vitro* culture conditions. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2014;6(116):24-29. [in Russian] (Сащенко М.Н., Подвигина О.А. Особенности развития растений гороха при микроклональном размножении в условиях культуры *in vitro*. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2014;6(116);24-29).

Soboleva G.V. Regeneration of peas plants (*Pisum sativum* L.) in callus tissue culture. *Legumes and Groat Crops*. 2016;3(19);27-35. [in Russian] (Соболева Г.В. Регенерация растений гороха (*Pisum sativum* L.) в культуре каллусной ткани. *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2016;3(19);27-35).

Song G.Q., Han X., Wiersma A.T., Zong X., Awale H.E., Kelly J.D. Induction of competent cells for *Agrobacterium tumefaciens*-mediated stable transformation of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *PLoS One*. 2020;15(3):e0229909. DOI: 10.1371/journal.pone.0229909

Türkoğlu A., Bolouri P., Haliloğlu K., Eren B., Demirel F., Işık M.İ. et al. Modeling callus induction and regeneration in hypocotyl explant of fodder pea (*Pisum sativum* var. *arvense* L.) using machine learning algorithm method. *Agronomy*. 2023;13(11):2835. DOI: 10.3390/agronomy13112835

Tzitzikas E.N., Bergervoet M., Raemakers K., Vincken J.P., van Lammeren A., Visser R.G.F. Regeneration of pea (*Pisum sativum* L.) by a cyclic organogenic system. *Plant Cell Reports*. 2004;23(7):453-460. DOI: 10.1007/s00299-004-0865-0

Ukhatova Y.V., Erastenkova M.V., Korshikova E.S., Krylova E. A., Mikhailova A.S., Semilet T.V. et al. Improvement of crops using the CRISPR/Cas system: new target genes. *Molecular Biology*. 2023;57(3):375-397. DOI: 10.1134/S0026893323030135

Wada N., Ueta R., Osakabe Y., Osakabe K. Precision genome editing in plants: state-of-the-art in CRISPR/Cas9-based genome engineering. *BMC Plant Biology*. 2020;20(1):234. DOI: 10.1186/s12870-020-02385-5

Wu D.T., Li W.X., Wan J.J., Hu Y.C., Gan R.Y., Zou L. A comprehensive review of pea (*Pisum sativum* L.): chemical composition, processing, health benefits, and food applications. *Foods*. 2023;12(13):2527. DOI: 10.3390/foods12132527

Информация об авторах

Ольга Владимировна Путина, кандидат биологических наук, старший 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, olga-rhji@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1013-7273

Руслан Султанович Рахмангулов, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, r.rakhmangulov@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0003-1200-3113

Надежда Васильевна Поливара, младший 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, olgarhji@gamil.com, https://orcid.org/0009-0000-5789-5149

Наталья Николаевна Коваленко, доктор биологических наук, заведующая лабораторией, 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, nnkovalenko59@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5287-7635

Юлия Васильевна Ухатова, кандидат биологических наук, заместитель директора, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, y.ukhatova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0001-9366-0216

Елена Константиновна Хлесткина, доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, директор, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, director@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-8470-8254

Information about the authors

Olga V. Putina, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Krymsk Experiment Breeding Station – branch of VIR, 12 Vavilova St., Krymsk 353384, Russia, olga-rhji@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1013-7273

Ruslan S. Rakhmangulov, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Head of a Laboratory, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, r.rakhmangulov@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0003-1200-3113

Nadezhda V. Polivara, Associate Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Krymsk Experiment Breeding Station – branch of VIR, 12 Vavilova St., Krymsk 353384, Russia, olgarhji@gamil.com, https://orcid.org/0009-0000-5789-5149

Natalya N. Kovalenko, Dr. Sci. (Biology), Head of a Laboratory, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Krymsk Experiment Breeding Station – branch of VIR, 12 Vavilova St., Krymsk 353384, Russia, nnkovalenko59@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5287-7635

Yulia V. Ukhatova, Cand. Sci. (Biology), Deputy Director, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, y.ukhatova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0001-9366-0216

Elena K. Khlestkina, Dr. Sci. (Biology), Corresponding Member of the RAS, Director, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, director@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-8470-8254

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

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

Статья поступила в редакцию 01.08.2025; одобрена после рецензирования 20.04.2026; принята к публикации 04.05.2026.
The article was submitted on 01.08.2025; approved after reviewing on 20.04.2026; accepted for publication on 04.05.2026.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 582.572.7:631.53(575)
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o7

CC BY

Особенности латентного периода *Iris pallasii* Fisch. ex Trevir. (Iridaceae)

М. С. Рамазанова[1], К. Г. Ткаченко[2], Н. Г. Гемеджиева[1], Н. Е. Староверов[3], А. Ю. Грязнов[3], Р. Б. Арысбаева[1]

[1] *Институт ботаники и фитоинтродукции Комитета лесного хозяйства и животного мира Министерства экологии и природных ресурсов Республики Казахстан, Алматы, Казахстан*

[2] *Ботанический институт им. В.Л. Комарова Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия*

[3] *Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия*

Автор, ответственный за переписку: Кирилл Гавриилович Ткаченко, kigatka@rambler.ru

Актуальность. Виды рода *Iris* L. привлекают внимание исследователей как источник биологически активных соединений, перспективных для создания лекарственных препаратов. Данные по особенностям латентного периода вида *Iris pallasii* Fisch. ex Trevir. флоры Казахстана отсутствуют.
Материалы и методы. Семена собрали в период 2015–2022 гг. в Алматинской области и от растений, выращиваемых на коллекционном участке лекарственных растений Ботанического сада Института ботаники и фитоинтродукции. Для оценки качества семян *I. pallasii* использовали мягколучевую передвижную рентгеновскую диагностическую установку. В качестве стандартного стимулятора роста использовали 0,3-процентный раствор перекиси водорода, а также 0,05-процентный раствор эпинбрассинолида и «Биостим». Контроль проращивали только на воде.
Результаты. Масса 1000 семян вида колеблется незначительно, независимо от их происхождения: масса природных семян *I. pallasii* – от 17,2 до 19,1 г, интродуцированные растения этого вида дают семена немного большей массой – от 18,1 до 19,7 г. Результаты оценки лабораторной всхожести семян *I. pallasii* показали, что применение различных методов стимуляции роста способствовало повышению их всхожести, что проявилось при длительном проращивании семян (до 110 дней). Отмечено, что максимальное число прорастающих семян фиксировали на протяжении 30–40 (до 80) дней опыта. При этом часть семян (как в контроле, так и в опыте) проросла лишь на 100–110-й дни опыта.
Заключение. В разные годы *I. pallasii* формирует семена разного качества. В условиях культивирования в Ботаническом саду, как правило, они имеют больший процент выполненных, полноценных семян, имеющих высокую всхожесть, которая сохраняется длительное время. Стимуляторы роста способствуют повышению лабораторной всхожести семян на 10–20%. Максимальное число прорастающих семян *I. pallasii* во всех вариантах опыта, независимо от места произрастания, отмечалось в период с 40-го по 80-й день.

Ключевые слова: дикорастущие и культивируемые виды растений, качество семян, рентгенография семян, лабораторная всхожесть, стимуляторы прорастания семян

Благодарности: работа выполнена в соответствии с темой докторской (PhD) диссертации: «Перспективы использования в качестве лекарственного сырья видов рода *Iris* L. флоры Юго-Восточного Казахстана» (2022–2025 гг.) и проходила в рамках выполнения плановых работ по теме «История создания, состояние, потенциал развития живых коллекций растений Ботанического сада Петра Великого БИН РАН». Регистрационный номер 124020100075-2.

Для цитирования: Рамазанова М.С., Ткаченко К.Г., Гемеджиева Н.Г., Староверов Н.Е., Грязнов А.Ю., Арысбаева Р.Б. Особенности латентного периода *Iris pallasii* Fisch. ex Trevir. (Iridaceae). *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(2):105-113. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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.

© Рамазанова М.С., Ткаченко К.Г., Гемеджиева Н.Г., Староверов Н.Е., Грязнов А.Ю., Арысбаева Р.Б., 2026

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o7

Latent period characteristics of *Iris pallasii* Fisch. ex Trevir. (Iridaceae)

Madina S. Ramazanova[1], Kirill G. Tkachenko[2], Nadezhda G. Gemejiyeva[1], Nikolai E. Staroverov[3], Artem Yu. Gryaznov[3], Raya B. Arysbaeva[1]

[1] *Institute of Botany and Phytointroduction of the Committee for Forestry and Wildlife of the Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan*

[2] *Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*

[3] *St. Petersburg Electrotechnical University, St. Petersburg, Russia*

Corresponding author: Kirill G. Tkachenko, kigatka@rambler.ru

Background. Species of the genus *Iris* L. attract the attention of researchers as a source of bioactive compounds promising for the development of medicinal drugs. There are no data on the characteristics of the latent period for *Iris pallasii* Fisch. ex Trevir. in the flora of Kazakhstan.
Materials and methods. Seeds were collected from 2015 through 2022 in Almaty Region and from plants grown in the medicinal plant collection plot of the Botanical Garden of the Institute of Botany and Phytointroduction. A soft-beam mobile X-ray diagnostic unit was used to assess the quality of *I. pallasii* seeds. A 0.3% hydrogen peroxide solution, a 0.05% epibrassinolide solution, and Biostim were applied as standard growth stimulants. Control plants were germinated in water only.
Results and discussion. The 1000-seed weight varied slightly within the species, regardless of the origin of seeds: natural *I. pallasii* seeds weighed from 17.2 to 19.1 g, while introduced plants of this species produced slightly larger seeds, weighing from 18.1 to 19.7 g. Laboratory evaluation of *I. pallasii* seed germination showed that the use of various growth stimulants contributed to increased germination, which was evident during prolonged seed germination (up to 110 days). The maximum number of germinating seeds was recorded during the 30–40 (up to 80) days of the experiment. However, some seeds (in both the control and experimental plants) germinated only on days 100–110 of the experiment.
Conclusion. *I. pallasii* produced seeds of varying quality in different years. Under cultivation conditions at the Botanical Garden, they typically produced a higher percentage of mature, viable seeds with high, long-lasting germination. Growth stimulants increased laboratory seed germination by 10–20%. The maximum number of germinating *I. pallasii* seeds under all experimental conditions, regardless of growing location, was observed between days 40 and 80.

Keywords: wild and cultivated plant species, seed quality, seed X-ray, laboratory germination, seed germination stimulants

Acknowledgments: this work was completed in accordance with the PhD dissertation topic: "Prospects for the use of *Iris* L. species from the flora of Southeastern Kazakhstan as medicinal raw materials" (2022–2025). It was also part of the planned work on the topic "History of the establishment, status, and development potential of live plant collections of the Peter the Great Botanical Garden, Botanical Institute, Russian Academy of Sciences". Registration number 124020100075-2.

For citation: Ramazanova M.S., Tkachenko K.G., Gemejiyeva N.G., Staroverov N.E., Gryaznov A.Yu., Arysbaeva R.B. Latent period characteristics of *Iris pallasii* Fisch. ex Trevir. (Iridaceae). *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(2):105-113. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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

Сохранение редких и исчезающих видов, в том числе и представителей рода Касатик – *Iris* L. (Iridaceae), – актуальная проблема настоящего времени. Изучением особенностей биологии и латентного периода, а в последние годы и через условия культивирования *in vitro* и культуру тканей разных видов рода *Iris* занимаются в разных странах (Arditti, Pray, 1969; Blumenthal et al., 1986; Holloway, 1987, 2007; Nabieva, 2010; Kartasheva, 2011; Pavlova, 2014; Androsova et al., 2023; Volis, 2024).

Iris pallasii Fisch. ex Trevir. (Czerepanov, 1995), касатик Палласа (каз. иклдак), – многолетнее травянистое, корневищное, плотнодерновинное растение, 30–40 см высотой; корневище довольно толстое, до 10 мм толщиной, усаженное шнуровидными мочками, несущее стебли и пучки прикорневых листьев, одетые при основании жесткими, волокнистыми остатками листовых влагалищ; стебли округлые, при основании со стеблеобъемлющими листьями, которые равны или обычно превышают стебли, 40–55 см длиной и 4–6 мм шириной, серовато-зеленые, линейные, прямые, длинно заостренные; цветки обычно в числе 2–5; листочки обвертки зеленые, по краям бело-пленчатые, ланцетные, длинно заостренные; трубка околоцветника во много раз короче отгиба, по отцветании остающаяся в виде носика у плода; наружные доли околоцветника отогнутые, бледно-синие или голубоватые, с лиловыми жилками, продолговатые, к основанию постепенно суженные, на верхушке тупо закругленные; внутренние доли немного короче и уже наружных; доли столбика лиловые, рыльце в виде маленьких треугольных лопастей. Плод – удлиненно-овальная коробочка, 4–5 см длиной, 8–10 мм шириной, 6-гранная, с носиком до 5 мм длиной; семена темно-бурые, почти шаровидные, слегка сжатые и оттянутые в короткий носик. Цветет V–VI. Плодоносит в VII–VIII.

Обитает на солончаковых лугах, около песков. Встречается в Балхаш-Алакольской котловине (Flora of Kazakhstan…, 1958; Illustrated guide…, 1969). В России встречается только в Западной Сибири. За пределами России – в Казахстане и в Монголии. Включен в Красную книгу Алтайского края как неопределенный, подверженный опасности вид, встречается по сухим песчаным берегам озер и рек, солончаковым бугристым болотам (Alexeyeva, 2020).

Основным способом размножения ирисов является семенной. Вопросами изучения латентного периода разных видов рода Ирис (Касатик) занимаются в разных регионах (Holloway, 2007; Tkachenko, 2013; O'Connor, 2019; Tashpulatov et al., 2021; Androsova et al., 2023). Работы по изучению особенностей латентного периода видов рода *Iris* флоры Казахстана отсутствуют.

Цель работы – изучение особенности латентного периода вида *Iris pallasii* Fisch. ex Trevir. природного и культигенного происхождения.

Материалы и методы

Материал собрали в разные годы (в период 2015–2022 гг.) в Алматинской области и от растений, выращиваемых на коллекционном участке лекарственных растений Ботанического сада Института ботаники и фитоинтродукции Комитета лесного хозяйства и животного мира Министерства экологии и природных ресурсов Республики Казахстан (КЛХЖМ МЭПР РК).

Образцы *I. pallasii* с № 1 по № 4 собраны на коллекционном участке лекарственных растений Ботанического сада в разные годы (2018, 2019, 2020, 2022) сбора; № 5 – Балхашский район, правый берег р. Или, 11–16 км юго-восточнее пос. Баканас, 2015 г.; № 6 – Балхашский район, пойма р. Или, 6 км от пос. Баканас, 2016 г.; № 7 – Балхашский район, пойма р. Или, окр. пос. Баканас, 2018 г.; № 8 – окр. пос. Актоган, левый берег р. Шилик, 2021 г.

Семена хранили в условиях лаборатории. Для биометрических измерении брали по 30 особей.

Для предварительной оценки качества семян *I. pallasii* использовали мягколучевую передвижную рентгеновскую диагностическую установку (ПРДУ-1; производство «Элтех-Мед», Россия) (Gryaznov et al., 2017; Tkachenko et al., 2018). И далее в опытах использовали отобранные, заведомо выполненные, полноценные семена.

Все отобранные семена *I. pallasii* одномоментно (в период с февраля по июнь 2023 г.) проращивали в стеклянных чашках Петри в лабораторных условиях на фильтровальной бумаге, которую увлажняли дистиллированной водой. Опыты по проращиванию семян проводили в четырех повторностях по 50–100 штук (в зависимости от размеров семян). Проросшими считали семена, размер корешков которых был равен или превышал диаметр семени.

В качестве стандартного стимулятора роста использовали 0,3-процентный раствор перекиси водорода (Baranova et al., 2014), а также 0,05-процентный раствор эпинбрассинолида (коммерческий препарат «Эпин-экстра» производства ННПП НЭСТ, Москва, РФ) и «Биостим» (производства «Агрохим», Щёлково, Московская обл.). Препараты применяли согласно прилагающимся инструкциям. Контроль проращивали только на воде. В связи с тем, что в стандартные первые 30 дней опыта проросло незначительное число семян, было принято решение продлить эксперимент с проращиванием до 110 дней.

В случае если на поверхности семян развивались плесневые грибы, их промывали хлоргексидином и/или замачивали в препарате «Фитоспорин М». Учет всходов проводили каждые 2–4 дня (Ishmuratova, Tkachenko, 2009). Обработка данных проведена стандартными программами Excel.

Результаты и обсуждение

Впервые на коллекционный участок лекарственных растений Ботанического сада *I. pallasii* был привлечен осенью 2015 г. корневищами; в последующие годы привлекался в разные сроки из поймы р. Или (Южное Прибалхашье). Приживаемость корневищ этого вида, перенесенных из мест естественного произрастания, независимо от срока посадки, была высокая – до 80–100%. В плодах формируется от 9 до 70 (в среднем около 40 штук) семян (табл. 1).

Применение различных методов предпосевной обработки семян (промораживание, скарификация) дало положительный эффект, который при скарификации повысил лабораторную всхожесть до 10 %.

Как видно из таблицы 1, средние величины биометрических показателей плодов и семян, собранных от растений, культивируемых в Ботаническим саду, несколько выше, чем у таковых из природных популяций, но эти различия статистически недостоверны. Масса 1000 семян внутри вида колеблется незначительно и независи-

Таблица 1. **Усредненные биометрические параметры семян и плодов *Iris pallasii* Fisch. ex Trevir. разного происхождения**

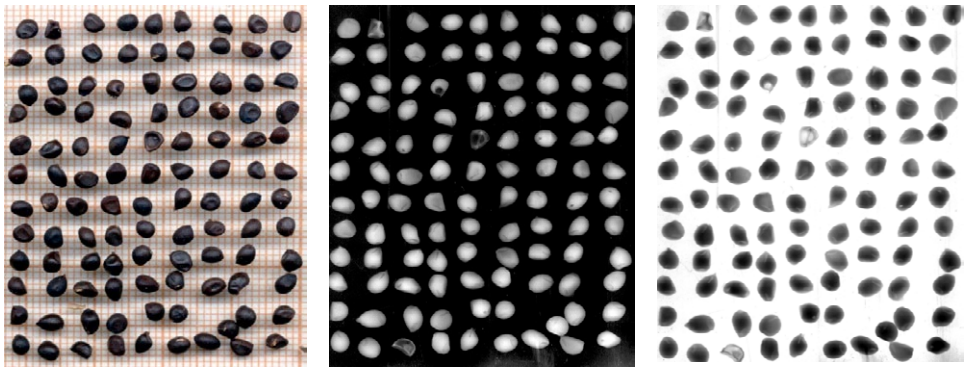
Table 1. **Average biometric parameters of seeds and fruits of *Iris pallasii* Fisch. ex Trevir. of various origin**

Значения	Длина		Ширина		Число семян в плоде, шт.	Масса 1000 шт. семян
	Плода, мм	Семени, мм	Плода, мм	Семени, мм		
Природные популяции						
Среднее	34 ± 3	3,5 ± 0,1	9,3 ± 0,3	3,0 ± 0,0	39 ± 4	18,4 ± 0,5
Min–Max	20–45	3,0–4,0	7,0–10,0	2,9–3,1	9–69	17,2–19,1
Культивируемые в Ботаническом саду						
Среднее	35 ± 3	3,6 ± 0,2	9.4 ± 0.4	3,0 ± 0,0	40 ± 6	18.9 ± 0,6
Min–Max	20–46	3,0–4,0	7,0–10,0	2,9–3,1	16–70	18,1–19,7

мо от их происхождения: масса природных семян *I. pallasii* – от 17,2 до 19,1 г, интродуцированные растения этого вида дают семена немного большей массой – от 18,1 до 19,7 г (см. табл. 1).

На рисунках 1–3 представлены сканированные изображения и рентгеновские снимки семян *I. pallasii* разного происхождения.

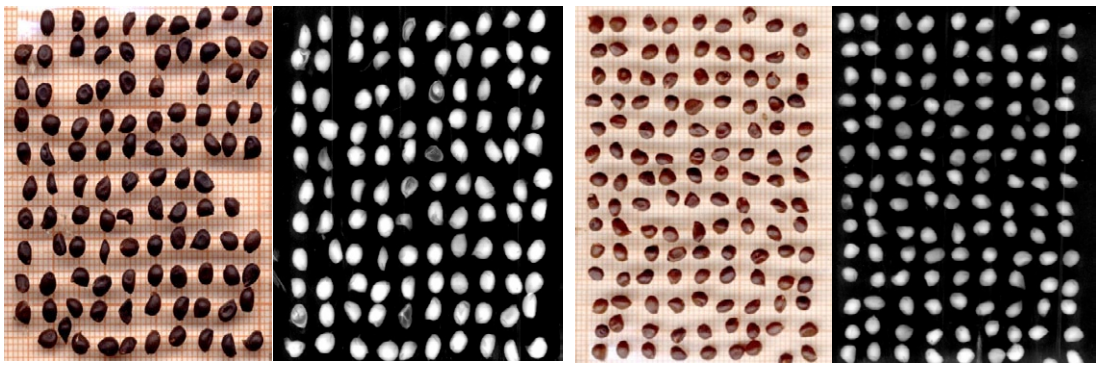
На рисунке 1 представлены изображения семян *I. pallasii* и их рентгенограмма. Семена были собраны в пойме р. Или Балхашского района в 2015 г. На снимках видно, что данная партия семян выполнена на 90–95%, только незначительная часть оказалась щуплой (внутренние структуры не развиты). Лабораторная всхожесть семян



A **B** **C**

Рис. 1. **Семена *Iris pallasii* Fisch. ex Trevir., собранные в пойме р. Или Балхашского района, урожай 2015 г.**
(**A** – сканированные и их рентгеновский снимок: **B** – негатив; **C** – позитив)

Fig. 1. **Seeds of *Iris pallasii* Fisch. ex Trevir. collected in the Ili River floodplain, Balkhash District, harvest of 2015**
(**A** – scanned seeds and their X-ray: **B** – negative; **C** – positive)



A **B**

Рис. 2. **Сканированные семена *Iris pallasii* Fisch. ex Trevir. и их рентгенограмма:**
A – пойма р. Или Балхашского района, 2018 г.; **B** – коллекционный участок лекарственных растений Ботанического сада, 2018 г.

Fig. 2. **Scanned seeds of *Iris pallasii* Fisch. ex Trevir. and their X-ray diffraction pattern:**
A – Ili River floodplain, Balkhash District, 2018; **B** – medicinal plant collection plot, Botanical Garden, 2018

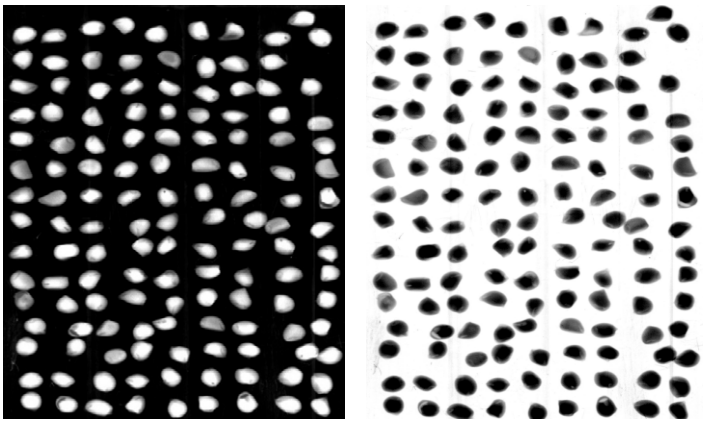


Рис. 3. Семена *Iris pallasii* Fisch. ex Trevir., коллекционный участок Ботанического сада, 2020 г.
Негатив (слева) и позитив (справа)

Fig. 3. *Iris pallasii* Fisch. ex Trevir. seeds, Botanical Garden collection plot, 2020.
Negative (left), and positive (right)

этой партии составила от 30% в контроле до 90% у семян, обработанных препаратом «Эпин-экстра» (0,5%).

Выполненных, полноценных семян, собранных в 2018 г. из поймы р. Или Балхашского района, оказалось меньше (около 75–80%), чем в образце, собранном в том же году в Ботаническом саду, в котором доля таковых оказалась намного выше – до 100% (рис. 2, В).

Как видно из рисунка 3, при значительном числе (до 90%) выполненных семян есть как пустые (не более 5%), так и с нарушениями внутренней структуры (до 5%). Применение разных стимуляторов для прорастания семян дало положительный эффект (табл. 2), у обработанных семян *I. pallasii* лабораторная всхожесть увеличивались от 5–10 до 20–30%.

Результаты оценки лабораторной всхожести семян *I. pallasii*, собранных в период с 2015 по 2022 г. из разных природных сообществ: пойма р. Или южнее пос. Баканас Балхашского района (17.09.2015; 05.09.2016; 2018), а также от культивируемых растений на участке лекарственных растений Ботанического сада института (25.08.2018; 09.08.2019; 24.07.2020; 01.08.2022), приведены в таблице 2. Применение различных методов стимуляции роста (3-процентный раствор перекиси водорода, «Биостим», «Эпин-экстра») способствовало повышению их всхожести, что проявилось при длительном проращивании семян (до 110 дней). Отмечено, что максимальное число прорастающих семян фиксировали на протяжении 30–80 дней опыта. При этом часть семян (как в контроле,

Таблица 2. Лабораторная всхожесть семян *Iris pallasii* Fisch. ex Trevir. разного происхождения и сроков хранения

Table 2. Laboratory germination of *Iris pallasii* Fisch. ex Trevir. seeds of various origin and storage periods

Образец	Год сбора	Варианты опыта	Прорастание семян в %, на дни опыта				
			21-й день	30-й день	60-й день	110-й день	Всего, %
№ 1	2018	H_2O_2 (3%)	–	26	11	11	48
		«Биостим» (0,05%)	21	58	20	–	99
		«Эпин-экстра» (0,05%)	4	22	58	11	95
		Контроль	7	34	13	3	57
№ 2	2019	H_2O_2 (3%)	30	30	15	–	75
		«Биостим» (0,05%)	32	32	22	–	86
		«Эпин-экстра» (0,05%)	13	60	10	10	93
		Контроль	9	22	13	3	57
№ 3	2020	H_2O_2 (3%)	3	37	28	–	68
		«Биостим» (0,05%)	55	20	17	–	92
		«Эпин-экстра» (0,05%)	11	36	38	3	88
		Контроль	17	30	12	3	62

Таблица 2. Окончание
Table 2. The end

Образец	Год сбора	Варианты опыта	Прорастание семян в %, на дни опыта				
			21-й день	30-й день	60-й день	110-й день	Всего, %
№ 4	2022	H_2O_2 (3%)	38	27	13	4	82
		«Биостим» (0,05%)	51	25	7	3	86
		«Эпин-экстра» (0,05%)	11	40	6	28	85
		Контроль	17	25	18	23	83
№ 5	2015	H_2O_2 (3%)	–	32	25	8	65
		«Биостим» (0,05%)	–	13	46	16	75
		«Эпин-экстра» (0,05%)	–	4	50	34	91
		Контроль	–	–	13	17	30
№ 6	2016	H_2O_2 (3%)	–	17	8	11	36
		«Биостим» (0,05%)	–	–	8	–	8
		«Эпин-экстра» (0,05%)	3	22	34	21	80
		Контроль	–	7	17	4	28
№ 7	2018	H_2O_2 (3%)	17	40	29	–	86
		«Биостим» (0,05%)	–	7	57	17	81
		«Эпин-экстра» (0,05%)	–	8	8	14	30
		Контроль	3	15	21	–	39
№ 8	2021	H_2O_2 (3%)	–	–	10	–	10
		«Биостим» (0,05%)	–	–	15	–	15
		«Эпин-экстра» (0,05%)	–	7	20	27	54
		Контроль	33	–	6	6	45

Примечание: образец с № 1 по № 4 – коллекционный участок лекарственных растений Ботанического сада разных лет (2018, 2019, 2020, 2022) сбора; № 5 – Балхашский район, правый берег р. Или, 11–16 км юго-восточнее пос. Баканас, 2015 г.; № 6 – Балхашский район, пойма р. Или, 6 км от пос. Баканас, 2016 г.; № 7 – Балхашский район, пойма р. Или, окр. пос. Баканас, 2018 г.; № 8 – окр. пос. Актоган, левый берег р. Шилик, 2021 г.; «–» – отсутствие проросших семян

Note: samples No. 1 to No. 4 are from the medicinal plant collection plot of the Botanical Garden, harvests of different years (2018, 2019, 2020, and 2022); No. 5 is from Balkhash District, the right bank of the Ili River, 11–16 km southeast of Bakanas Settlem., 2015; No. 6 is from Balkhash District, the Ili River floodplain, 6 km from Bakanas Settlem., 2016; No. 7 is from Balkhash District, the Ili River floodplain, vicinity of Bakanas Settlem., 2018; No. 8 is from the vicinity of Aktogan Settlem., the left bank of the Shilik River, 2021; "–" – no germinated seeds

так и в опыте) проросла лишь на 100–110-е дни опыта. (рис. 4, 5).

Как видно из данных таблицы 2, семена *I. pallasii*, собранные от растений, выращенных на коллекционном участке лекарственных растений Ботанического сада в разные годы, не обработанные стимуляторами, имели следующую лабораторную всхожесть: семена урожая 2018 и 2019 г. – по 57%, 2020 г. – 62%, и самый высокий показатель был у семян урожая 2022 г. – 83%. Семена, собранные в природных популяциях: Балхашский район, правый берег р. Или, 11–16 км юго-восточнее пос. Баканас, в 2015 г. – 30%, в 2016 г. – 28%, а в 2018 г. – 39%. Следовательно, условия 2018 г. были наиболее благоприятными для формирования семян, нежели условия 2016 г. При этом семена, собранные в окр. пос. Актоган, левый берег р. Шилик, в 2021 г., проросли всего на 45%. Из результатов видно, что культивируемые растения продуцируют семена более высокого качества, которые имеют достаточно высокую лабораторную всхожесть, сохраняющуюся продолжительное время.

Выбранные стимуляторы роста (H_2O_2, «Биостим» и «Эпин-экстра») для прорастания семян практически во всех вариантах опытов со всеми образцами семян *I. pallasii* оказали положительный эффект (см. табл. 2).

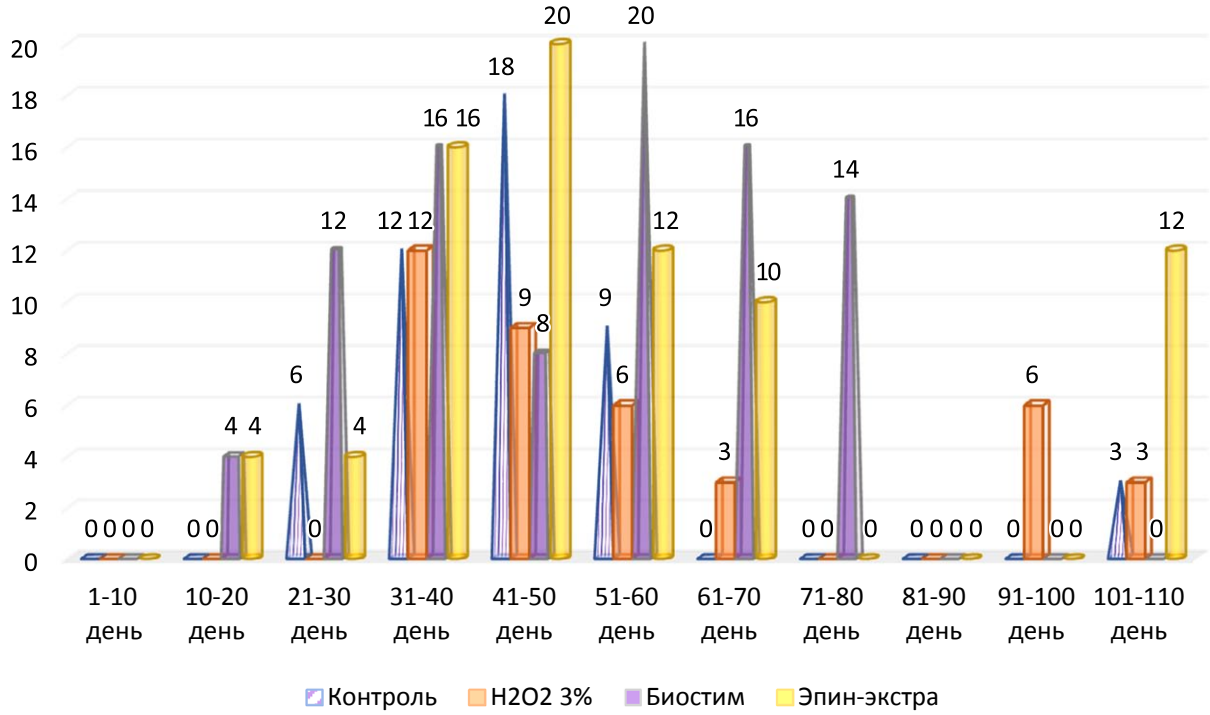


Рис. 4. **График прорастания семян *Iris pallasii* Fisch. ex Trevir. (урожай 2018 г.)**
Fig. 4. ***Iris pallasii* Fisch. ex Trevir. seed germination chart (the 2018 harvest)**

Рис. 5. **Начальные фазы прорастания *Iris pallasii* Fisch. ex Trevir.**
Fig. 5. **Initial germination stages of *Iris pallasii* Fisch. ex Trevir. seeds**

Продолжительное проращивание позволило выявить затянутое прорастание семян *I. pallasii*. Однако семена, собранные в 2021 г. (через 2 года хранения) с левого берега р. Шилик, проросли хуже всех других образцов. И на их прорастание не оказали выраженного положительного эффекта ни обработка перекисью водорода, ни применение «Биостима». При этом эти семена, обработанные «Эпин-экстра», проросли на 54%, что выше контроля на 9%.

Важно подчеркнуть, что традиционные ГОСТы по оценке качества семян (проращивание в опыте в течение только 30 дней) показали бы низкое качество и плохую лабораторную всхожесть (от 0 до 17%). При растянутом во времени проращивании семян *I. pallasii* (в течение 110 дней) выяснилось, что они могут прорастать очень долго. Подобное явление было зафиксировано и при проращивании семян разных лет сбора видов семейства Cactaceae из коллекции семенной лаборатории Ботанического сада Петра Великого БИН РАН, при этом отмечено, что значительное число семян начинает активно прорастать через 60 и даже 90 дней опыта (Tkachenko, 2020b).

При внешне одинаковом виде семян *I. pallasii* им свойственна гетероспермия, так же как она свойственна подавляющему числу видов растений. Проявляется она по-разному: в биометрических показателях, в ритме прорастания семян в зависимости от степени сформированности и развитости зародыша, эндосперма, а также при длительности хранения (Tkachenko, 2020a; Bukharov, 2020).

Заключение

В разные годы, в зависимости от места выращивания, *I. pallasii* формирует семена разного качества.

Стимуляторы роста: 0,05-процентный раствор эпинбрассинолида (коммерческий препарат «Эпин-экстра» производства ННПП НЭСТ, Москва, РФ) и «Биостим» (производства «Агрохим», Щёлково, Московская обл.) способствуют повышению лабораторной всхожести семян *I. pallasii* на 10–20%.

Максимальное число прорастающих семян *I. pallasii* во всех вариантах опыта, независимо от места произрастания, отмечалось в период с 40-го по 80-й день.

References / Литература

Alexeyeva N.B. Irises – *Iris* L. (Iridaceae Juss.) of Russia. St. Petersburg: First Publishing and Printing Holding; 2020. [in Russian] (Алексеева Н.Б. Ирисы – *Iris* L. (Iridaceae Juss.) России. Санкт-Петербург: Первый ИПХ; 2020).

Androsova D.N., Danilova N.S., Tkachenko K.G., Staroverov N.E., Gryaznov A.Yu. Fruit and seed plumpness, germination and viability of rare plants in Yakutia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(4):12-20. [in Russian] (Андросова Д.Н., Данилова Н.С., Ткаченко К.Г., Староверов Н.Е., Грязнов А.Ю. Выполненность, всхожесть и жизнеспособность плодов и семян редких растении Якутии. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(4):12-20). DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-12-20

Arditti J., Pray T.R. Dormancy factors in *Iris* (Iridaceae) seeds. *American Journal of Botany*. 1969:56(3):254-259. DOI: 10.1002/j.1537-2197.1969.tb07531.x

Baranova T., Kalaev V., Voronin A. Environmentally safe growth stimulator for pre-sowing seed treatment. *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University*. 2014;(7):96-102. [in Russian] (Баранова Т.В., Калаев В.Н., Воронин А.А. Экологичные стимуляторы роста для предпосевной обработки семян. *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта*. 2014;(7):96-102).

Blumenthal A., Lerner H.R., Werker E., Poljakoff-Mayber A. Germination preventing mechanisms in *Iris* seeds. *Annals of Botany*. 1986;58(4):551-561. http://www.jstor.org/stable/42757699

Bukharov A.F. Variability and heterogeneity of seeds: theory and practice (review). *Vegetable Crops of Russia*. 2020;(2):23-31. [in Russian] (Бухаров А.Ф. Разнокачественность семян: теория и практика (обзор). *Овощи России*. 2020;(2):23-31). DOI: 10.18619/2072-9146-2020-2-23-31

Czerepanov S.K. Plantae vasculares Rossicae et civitatum collimitanearum (in limicis USSR olim). 3rd ed. St. Petersburg: Mir i Semya; 1995. [in Russian] (Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). 3-е изд. Санкт-Петербург: Мир и семья; 1995).

Gryaznov A., Staroverov N., Batalov K., Tkachenko K. Application of microfocus X-ray method to control the quality of seeds. *Fruit Growing and Viticulture of South Russia*. 2017;48(6):46-55. [in Russian] (Грязнов А.Ю., Староверов Н.Е., Баталов К.С., Ткаченко К.Г. Применение метода микрофокусной рентгенографии для контроля качества семян. *Плодоводство и виноградарство юга России*. 2017;48(6):46-55).

Holloway P.S. How to germinate seeds of Alaska wild iris. *Georgeson Botanical Notes*. 2007;(36):19-20.

Holloway P.S. Seed germination of Alaska iris, *Iris setosa* ssp. *interior*. *HortScience*. 1987;22:898-899. DOI: 10.21273/hortsci.22.5.898

Illustrated guide to the plants of Kazakhstan. Vol. 1. Alma-Ata: Nauka; 1969. [in Russian] (Иллюстрированный определитель растений Казахстана. Т. 1. Алма-Ата: Наука; 1969).

Ishmuratova M.M., Tkachenko K.G. Seeds of herbaceous plants. Features of the latent period, use in introduction and reproduction *in vitro* (Semena travyanistykh rasteniy. Osobennosti latentnogo perioda, ispolzovaniye v introduktsii i razmnozhenii *in vitro*). Ufa: Gilem; 2009. [in Russian] (Ишмуратова М.М., Ткаченко К.Г. Семена травянистых растений. Особенности латентного периода, использование в интродукции и размножении *in vitro*. Уфа: Гилем; 2009).

Kartasheva L.M. Ontogenesis of rare and poorly known species of Iridaceae Juss. at its introduction in the Central Black Soil Region. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*. 2011;(1):167-170. [in Russian] (Карташева Л.М. Онтогенез редких и малоизученных видов семейства Iridaceae Juss. при интродукции в Центральном Черноземье. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*. 2011;(1):167-170).

Nabieva A.Y. Microclonal propagation of some rare *Iris* species. In: T.P. Sviridova (ed.). *Works of Tomsk State University. Vol. 274. Biological Series: Botanical Gardens. Problems of Introduction (Trudy Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. T. 274. Ser. Biologicheskaya: Botanicheskiye sady. Problemy introduktsii)*. Tomsk: Tomsk State University; 2010. p.270-271. [in Russian] (Набиева А.Ю. Микроклональное размножение некоторых редких видов рода *Iris* L. В кн.: *Труды Томского государственного университета. Т. 274. Сер. биологическая: Ботанические сады. Проблемы интродукции* / под ред. Т.П. Свиридовой. Томск: Томский государственный университет; 2010. С.270-271).

O'Connor P. It's about time to grow some irises from seed. *Fleur de Lis: The Journal of the Society for Louisiana Irises*. 2019;(2):16-21.

Pavlova M.A. The results of *Iris domestica* Goldblatt & Mabb. introduction in the steppe zone of Ukraine. *Bulletin of the Botanical Garden-Institute FEB RAS*. 2014;(12):14-21. [in Russian] (Павлова М.А. Результаты первичной интродукции *Iris domestica* Goldblatt & Mabb. в степной зоне Украины. *Бюллетень Ботанического сада-института ДВО РАН*. 2014;(12):14-21).

Polyakov P.P. Family Iridaceae Lindl. In: N.V. Pavlov (ed.). *Flora of Kazakhstan (Flora Kazakhstana). Vol. 2*. Alma-Ata: Academy of Sciences of the Kazakh SSR; 1958. p.232-246. [in Russian] (Поляков П.П. Семейство Касатиковые – Iridaceae Lindl. В кн.: *Флора Казахстана. Т. 2* / под ред. Н.В. Павлова. Алма-Ата: АН КазССР; 1958. С.232-246).

Tashpulatov Y.Sh., Rasulova Z.A., Turopova M.I. Germination of seeds of the genus *Iris* under laboratory conditions. *Significances of Bioengineering and Biosciences*. 2021;5(1):453-455. DOI: 10.31031/SBB.2021.05.000603

Tkachenko K. Diversity of fruits and seeds, which determines the rhythms of new generation individual development. *Hortus Botanicus*. 2020a;15:226-253. [in Russian] (Ткаченко К.Г. Разнокачественность плодов и семян, определяющая ритмы развития особей нового поколения. *Hortus Botanicus*. 2020a;15:226-253).

Tkachenko K. Latent time characteristic of some species of Cactaceae family cultivated in Peter the Great Botanical garden. *Hortus Botanicus*. 2020b;15:210-225. [in Russian] (Ткаченко К.Г. Особенности латентного периода представителей семейства Cactaceae, культивируемых в Ботаническом саду Петра Великого. *Hortus Botanicus*. 2020b;15:210-225). DOI: 10.15393/j4.art.2020.7286

Tkachenko K., Staroverov N., Gryaznov A. X-ray quality control of fruits and seeds. *Hortus Botanicus*. 2018;13:52-66). [in Russian] (Ткаченко К.Г., Староверов Н.Е., Грязнов А.Ю. Рентгенографическое изучение качества плодов

и семян. *Hortus Botanicus*. 2018;13:52-66). DOI: 10.15393/j4.art.2018.5022

Tkachenko K.G. *Iris* L. genus in collection-exposition of "Alpinarium" at Peter the Great Botanical Garden of the Komarov Botanical Institute of RAS. *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*. 2013;(3):35-43. [in Russian] (Ткаченко К.Г. Виды рода *Iris* L. в коллекциях-экспозициях живых растений Альпинария Ботанического сада Петра Великого Ботанического института РАН. *Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о земле*. 2013;(3):35- 43).

Volis S. Effect of intra-seasonal variation in precipitation on seed germination and seedling growth in *Iris atrofusca*: implications for conservation. *Israel Journal of Ecology and Evolution*. 2024:70(3):123-129. DOI: 10.1163/22244662-bja10074

Информация об авторах

Мадина Серикполовна Рамазанова, научный сотрудник, Институт ботаники и фитоинтродукции Комитета лесного хозяйства и животного мира Министерства экологии и природных ресурсов Республики Казахстан, 050040 Казахстан, Алматы, ул. Тимирязева, 36д, r.madin.c@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6121-9685

Кирилл Гавриилович Ткаченко, доктор биологических наук, старший научный сотрудник, Ботанический институт им. В.Л. Комарова Российской академии наук, 197022 Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 2, kigatka@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0001-6841-6561

Надежда Геннадьевна Гемеджиева, доктор биологических наук, профессор, Институт ботаники и фитоинтродукции Комитета лесного хозяйства и животного мира Министерства экологии и природных ресурсов Республики Казахстан, 050040 Казахстан, Алматы, ул. Тимирязева, 36д, ngemed58@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7317-2685

Николай Евгеньевич Староверов, кандидат технических наук, ассистент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197022 Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, nik0205st@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4404-5222

Артем Юрьевич Грязнов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197022 Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, ay-gryaznov@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-2062-2213

Рая Бижановна Арысбаева, старший научный сотрудник, Институт ботаники и фитоинтродукции Комитета лесного хозяйства и животного мира Министерства экологии и природных ресурсов Республики Казахстан, 050040 Казахстан, Алматы, ул. Тимирязева, 36д, rarysbaeva@list.ru, https://orcid.org/0000-0001-8034-0432

Information about the authors

Madina S. Ramazanova, Researcher, Institute of Botany and Phytointroduction of the Committee for Forestry and Wildlife of the Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Kazakhstan, 36D Timiryazev St., Almaty 050040, Kazakhstan, r.madin.c@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6121-9685

Kirill G. Tkachenko, Dr. Sci. (Biology), Senior Researcher, Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences, 2 Professora Popova Street, St. Petersburg 197022, Russia, kigatka@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0001-6841-6561

Nadezhda G. Gemejiyeva, Dr. Sci. (Biology), Professor, Institute of Botany and Phytointroduction of the Committee for Forestry and Wildlife of the Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Kazakhstan, 36D Timiryazev St., Almaty 050040, Kazakhstan, ngemed58@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7317-2685

Nikolai E. Staroverov, Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor, St. Petersburg Electrotechnical University, 5 Professora Popova Street, St. Petersburg 197022, Russia, nik0205st@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4404-5222

Artem Yu. Gryaznov, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of a Department, St. Petersburg Electrotechnical University, 5 Professora Popova Street, St. Petersburg 197022, Russia, ay-gryaznov@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-2062-2213

Raya B. Arysbaeva, Senior Researcher, Institute of Botany and Phytointroduction of the Committee of Forestry and Wildlife of the Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Kazakhstan, 36D Timiryazev St., Almaty 050040, Kazakhstan, rarysbaeva@list.ru, https://orcid.org/0000-0001-8034-0432

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

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

Статья поступила в редакцию 06.12.2025; одобрена после рецензирования 09.02.2026; принята к публикации 06.04.2026.
The article was submitted on 06.12.2025; approved after reviewing on 09.02.2026; accepted for publication on 06.04.2026.

ГЕНЕТИКА КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 633.34:575.113.1
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o3

CC BY

Геномные районы сои, ассоциированные со сроками цветения

М. Т. Меньков[1, 2], И. В. Сеферова[2], Е. А. Лепилова[1], Н. А. Швачко[2], А. П. Бойко[3], Е. К. Хлесткина[1, 2], И. В. Розанова[1]

[1] Научно-технологический университет «Сириус», Центр генетики и наук о жизни, Краснодарский край, Россия

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

[3] Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Адлерская опытная станция – филиал ВИР, Сочи, Россия

Автор, ответственный за переписку: Михаил Тимофеевич Меньков, menkov.mt@talantiuspeh.ru

Актуальность. Соя (*Glycine max* (L.) Merr.) – один из наиболее значимых объектов мирового сельского хозяйства. Важным направлением в селекции сои является оптимизация продолжительности вегетационного периода. Современные методы, включая использование ДНК-маркеров, позволяют ускорить отбор нужных генотипов. Одним из инструментов для выявления маркеров является полногеномный анализ ассоциаций (GWAS). Целью статьи было выявление локусов, ассоциированных с продолжительностью периода от всходов до цветения.
Материалы и методы. Был выполнен GWAS на данных трехлетнего полевого изучения (2023–2025) на Адлерской опытной станции – филиале ВИР (43.450° N, 39.933° E) и данных GBS (genotyping by sequencing) выборки из 169 образцов сои коллекции ВИР разного эколого-географического происхождения. Анализ выполнен с использованием программного обеспечения Tassel 5.0, реализующего смешанную линейную модель (MLM).
Результаты. Выявлено 48 значимых SNP, распределенных по 14 хромосомам. Среди них присутствуют известные QTL, участвующие в регуляции цветения, и потенциально новые локусы на хромосомах Gm1 (115 cM), Gm6 (117 cM), Gm7 (34–36 cM), Gm8 (116 cM), ранее не описанные в литературе.
Заключение. Помимо известных QTL, участвующих в регуляции цветения, в ходе исследования выявлены новые локусы, ранее не описанные в литературе. Изучение сортов сои, имеющих различное географическое происхождение, в условиях прибрежной зоны Черного моря позволило выявить новые маркеры, ассоциированные со сроком цветения.

Ключевые слова: соя, *Glycine max*, маркеры SNP, GWAS, фенология, сроки цветения

Благодарности: полногеномный анализ ассоциаций и анализ структуры популяции выполнены в рамках государственной программы федеральной территории «Сириус» «Научно-технологическое развитие федеральной территории “Сириус”» (соглашение № 18-03 от 10.09.2024). Формирование выборки сои осуществлено в рамках темы ВИР (FGEM-2022-0002), а ее генотипирование – в рамках программы Центра «Агротехнологии будущего» ВИР.
Авторы выражают признательность К. С. Клемешовой (Субтропический научный центр РАН, Сочи) за предоставление данных о погодных условиях.

Для цитирования: Меньков М.Т., Сеферова И.В., Лепилова Е.А., Швачко Н.А., Бойко А.П., Хлесткина Е.К., Розанова И.В. Геномные районы сои, ассоциированные со сроками цветения. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(2):114-127. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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.

© Меньков М.Т., Сеферова И.В., Лепилова Е.А., Швачко Н.А., Бойко А.П., Хлесткина Е.К., Розанова И.В., 2026

GENETICS OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o3

Genomic regions associated with flowering dates in soybean

Mikhail T. Menkov[1, 2], Irina V. Seferova[2], Ekaterina A. Lepilova[1], Natalia A. Shvachko[2], Alexander P. Boyko[3], Elena K. Khlestkina[1, 2], Irina V. Rozanova[1]

[1] *Sirius University of Science and Technology, Research Center of Genetics and Life Sciences, Krasnodar Territory, Russia*

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

[3] *N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Adler Experiment Station – branch of VIR, Sochi, Russia*

Corresponding author: Mikhail T. Menkov, menkov.mt@talantiuspeh.ru

Background. Soybean (*Glycine* L.) Merr.) is one of the most important crops worldwide. Optimizing the growing season is a key focus in soybean breeding. Modern methods, including the use of DNA markers, make it possible to accelerate selection of desired genotypes. One of the marker identification tools is a genome-wide association study (GWAS). The research objective was to pinpoint the loci associated with the duration of the germination-to-flowering period.
Materials and methods. The GWAS utilized the data from a three-year field study (2023–2025) conducted at Adler Experiment Station of VIR (43.450° N, 39.933° E), and the GBS data for a set of 169 soybean accessions from the VIR collection (origin: China, Russia, USA, Moldova, Canada, etc.). The Tassel 5.0 software was employed, implementing a mixed linear model (MLM).
Results. Forty-eight significant SNPs distributed across 14 chromosomes were identified. These included the known QTLs involved in flowering regulation and the potentially novel chromosome loci Gm1 (115 cM), Gm6 (117 cM), Gm7 (34-36 cM), and Gm8 (116 cM), previously undescribed in the literature.
Conclusion. The study of soybean cultivars of various geographic origin in the coastal zone of the Black Sea resulted in identifying new markers associated with flowering schedules.

Keywords: soybean, *Glycine max*, SNP markers, GWAS, phenology, flowering times

Acknowledgments: GWAS and population structure analyses were performed within the state program for the Sirius Federal Territory "Scientific and technological development of the Sirius Federal Territory" (Agreement No. 18-03 dated Sept. 10, 2024). Soybean accessions were sampled under the thematic plan of VIR (FGEM-2022-0002), and genotyped in the framework of the program for the *Agrotechnologies for the Future* Center.
The authors are grateful to K. S. Klemeshova (Subtropical Scientific Center of the RAS, Sochi) for providing data on weather conditions.

For citation: Menkov M.T., Seferova I.V., Lepilova E.A., Shvachko N.A., Boyko A.P., Khlestkina E.K., Rozanova I.V. Genomic regions associated with flowering dates in soybean. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(2):114-127. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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

Соя (*Glycine max* (L.) Merr.) – один из наиболее важных объектов мирового сельского хозяйства. Являясь представителем семейства Бобовые, это однолетнее травянистое растение характеризуется облигатным самоопылением и высокой адаптивностью к условиям среды.

Соя выращивается в широком диапазоне широт, от 56° северной широты до 35–37° южной широты, в более чем 60 странах (Fedorina et al., 2022). Будучи культурой короткого светового дня, соя демонстрирует удлинение вегетационного периода при выращивании в северных широтах, однако селекционерами выведены сорта, приспособленные к широкому спектру климатических зон (Qin et al., 2023).

Большое разнообразие генотипов сои является результатом пройденных исторических селекционных этапов. В процессе доместикации растений отбирались формы, наиболее полно обеспечивающие человека надежным источником питания. Культурная соя (*G. max*) произошла от дикой сои (*G. soja* Sieb. & Zucc.*)* в Китае примерно 5000 лет назад, после чего она распространилась по всему миру (Wang L. et al., 2016). На первых этапах доместикации человек не создавал новых форм, а отбирал варианты, предоставленные ему природой. Сознательный отбор появился в последние столетия: человек, не зная законов генетики, выбирал формы с более выраженными полезными свойствами, сохраняя наиболее приспособленные растения, дающие стабильный урожай. Однако с начала XX века отбор сменили методы искусственной гибридизации, массовый отбор сменился индивидуальным, стали применять целенаправленные скрещивания. Первые сорта, созданные путем контролируемого скрещивания, появились в 1940-х годах и позволили значительно расширить генетическое разнообразие культуры. Произошло повышение урожайности, уменьшение полегаемости, снижение растрескиваемости бобов и др. Были выделены источники и доноры для селекционной работы (Specht et al., 2015). Исторически отбор шел на повышение содержания масла в семенах, но в последние десятилетия приоритетным стало создание высокобелковых, а не высокомасличных сортов (Novikova et al., 2018).

Одним из ключевых направлений современной селекции сои является оптимизация вегетационного периода: в зонах рискованного земледелия (северные широты, горные регионы) предпочтение отдается раннеспелым сортам (75–90 дней), способным завершать цикл развития до наступления заморозков, минимизируя риски потерь урожая. Позднеспелые сорта (свыше 120 дней) преобладают в южных регионах с продолжительным теплым периодом, длинный период вегетации способствует накоплению биомассы и повышению продуктивности (Qin et al., 2023).

Генетическое разнообразие сои возникло в значительной степени на базе древних полногеномных дупликаций. Это дает возможность селекционерам находить и использовать гомеологичные гены, полученные от разных геномов, связанных с важными признаками, такими как длительность вегетационного периода, стрессоустойчивость и продуктивность растения. Благодаря этому можно более эффективно выбирать генотипы с нужными свойствами (Schmutz et al., 2010).

Публикация референсного генома сорта сои ‘Williams 82’ в 2010 г. (Schmutz et al., 2010) стала значимым событием в геномике бобовых, раскрыв особенности структуры генома (2n = 40, ~1115 Мб). В настоящее время усилия направлены на ускорение селекции сои с помощью ДНК-маркеров, которые позволяют идентифицировать нужные генотипы. Одним из методов для поиска и выявления маркеров является полногеномный анализ ассоциаций (GWAS) (Stupar et al., 2024). В отличии от метода, где используется скрещивание (например, QTL-анализ), GWAS работает с естественным генетическим разнообразием культуры, что ускоряет процесс селекции на 30–50% (Bhat, Yu, 2021). Для проведения GWAS необходимы данные фенотипирования и генотипирования выборки образцов. Одним из способов генотипирования выборки является метод GBS (Poland, Rife, 2012). Это секвенирование ограниченного набора репрезентативных участков генома, который отбирается с помощью ферментов рестрикции, разрезающих ДНК в специфических местах. Такой подход позволяет существенно уменьшить объем анализируемых данных и заметно снижает финансовые и временные затраты по сравнению с полногеномным секвенированием. Фенотипирование выборки проводят, как правило, в полевых условиях в течение трех лет, чтобы нивелировать влияние окружающей среды на проявление признаков (Rozanova et al., 2023). Таким образом, подход GWAS демонстрирует высокую практическую значимость в селекции, позволяет ускорить отбор перспективных генотипов без необходимости многократного скрещивания в полевых условиях.

В литературных источниках описан ряд локусов генома сои, связанных с регуляцией времени цветения, большая часть которых являются ортологами известных генов цветения, выявленных ранее у арабидопсиса. На сегодняшний день известно 12 основных генов, контролирующих время цветения и созревания (*E1–E11* и*J*). Их продукты задействованы в контроле фотопериода и циркадных ритмов, а также связывают внешние сигналы среды с внутренними механизмами регуляции. Так, *E1* кодирует B3-содержащий транскрипционный фактор, подавляющий экспрессию генов *GmFT2a* и *GmFT5a* и тем самым задерживающий цветение в условиях длинного дня; *E2* (*GmGIa*) участвует в работе циркадных часов; *J* (*GmELF3*) вовлечен в контроль циркадных ритмов и чувствительности фотопериода; ряд локусов *E3*, *E4* кодируют фитохромы, воспринимающие световые сигналы. Взаимодействие доминантных и рецессивных аллелей этих генов (особенно *E1–E4*) определяет фенологические фазы цветения и сроки созревания. Доминантные аллели локусов *E1–E4*, *E7*, *E8* и *E10* ассоциированы с поздним временем цветения и созревания, в то время как доминантные аллели локусов *E6*, *E9*, *E11* и *J* – с более ранним цветением (Fedorina et al., 2022).

В настоящее время прослеживается тенденция к увеличению площадей сои и ее валовому сбору (Menkov et al., 2025). Растущая востребованность сои требует увеличения ее производства, что обычно решается за счет расширения посевных площадей. Поэтому очень важны селекционные программы, направленные на создание сортов с заданными свойствами, одним из которых являются оптимальные сроки созревания. Показатель «дни до цветения» (days to flowering, DTF) является ключевым индикатором агрономически значимых признаков, включая скороспелость, напрямую влияющим на адаптацию сортов к короткому вегетационному периоду (северные регионы, высокогорье). Учитывая, что DTF напрямую связан с проявлением аллелей генов, контролирующих фотопериодическую реакцию и чувствительность к температуре, выявление локусов, ассоциирован-

ных с этим признаком, представляет собой важную задачу для селекции. С учетом изложенного актуальной целью является выявление геномных локусов, определяющих продолжительность межфазного периода «всходы – цветение» в разнообразной выборке образцов сои, с использованием современных методов генотипирования и ассоциативного анализа.

Цель исследования – выявить с помощью GWAS ключевые SNP-маркеры и геномные локусы, ассоциированные с продолжительностью периода «всходы – цветение» у сои, и оценить их потенциал для использования в селекции сортов с оптимальными сроками созревания.

Материалы и методы

Растительный материал

Для выявления геномных локусов, контролирующих срок цветения, создали выборку из 169 образцов сои из коллекции ВИР (Electronic Supplementary Materials, Table S1)[1]. Структуру выборки составили 163 образца (*G. max*), имеющих происхождение из 23 стран (Австралия, Аргентина, Беларусь, Бельгия, Венгрия, Германия, Канада, Китай, Колумбия, Латвия, Литва, Мексика, Молдова, Польша, Россия, США, Узбекистан, Украина, Франция, Чехия, Швеция, Южная Корея, Япония) (рис. 1), 2 образца (*G. gracilis* Skvortsov), произрастающих в провинциях Китая, и 4 образца (*G. soja*), произрастающих на Дальнем Востоке. Выборка формировалась с учетом разнообразия по происхождению и контрастности по признакам (морфологические признаки, группы спелости, продуктивность и т. д.) (см. рис. 1).

Образцы высевали в оптимальное время. Растения выборки, состоявшей из 169 образцов, высевались рядами по 2 метра на каждый образец (10 см между растениями). Расстояние между рядами составляло 70 см.

Погодные показатели в течение сезонов 2023–2025 гг. были в пределах нормальных климатических условий для данного региона (рис. 2). Различия по температуре между годами носят умеренный характер (см. рис. 2, a). Количество осадков заметно колебалось по месяцам относительно многолетней нормы, что свидетельствует о контрастных климатических условиях вегетационного периода. В апреле 2023 г. отмечен выраженный избыток влаги по сравнению со средними значениями, тогда как в мае – июне осадки были ближе к норме или несколько ниже. В июле 2023 г. количество осадков вновь значительно превышало многолетние показатели. В 2024 г. в апреле наблюдался минимум осадков, а в мае и августе их количество приблизилось к многолетнему. В июне – июле и сентябре наблюдалось снижение по сравнению с «нормой», что указывает на более сухие условия в середине лета. В 2025 г. осадки в апреле – мае были сопоставимы с многолетними значениями, в июне отмечен их избыток, а июль характеризовался умеренно пониженным уровнем влаги (см. рис. 2, b). Погодные показатели предоставлены К. В. Клемешовой (Субтропический научный центр РАН, г. Сочи).

Показатель «дни до цветения» (DTF) определяли в полевых условиях как количество дней от даты всходов до момента, когда 50% растений сорта показали первый цветок. Наблюдения проводились ежедневно на опытном поле (Vishniyakova et al., 2018). Описательная стати-

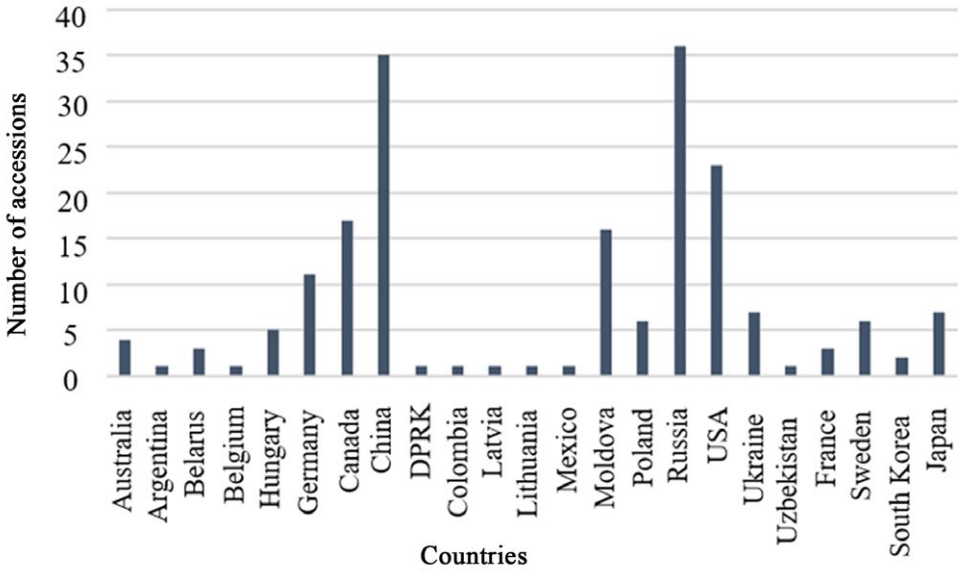


Рис. 1. Число проанализированных образцов сои из разных стран

Fig. 1. Number of the analyzed soybean accessions from various countries

Полевой эксперимент и фенотипирование

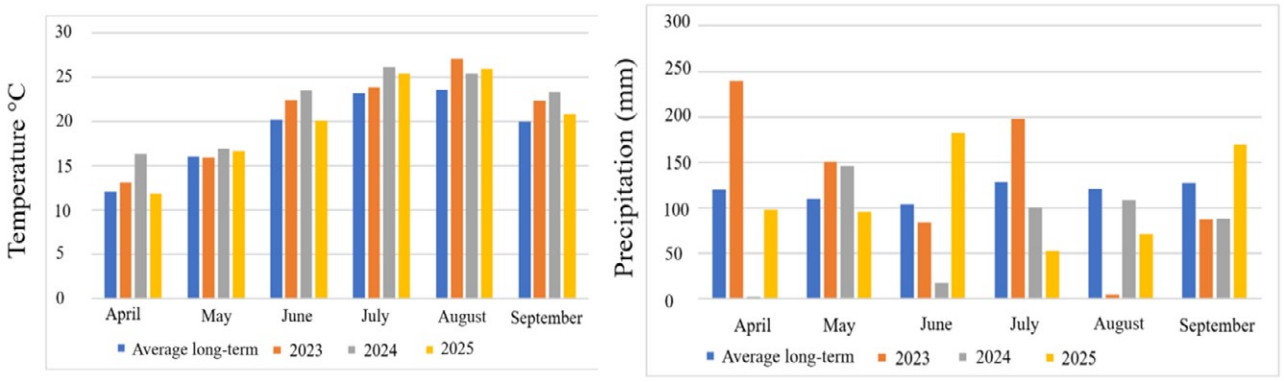
Эксперимент проводился в течение трех лет (2023, 2024 и 2025) с мая по октябрь в условиях прибрежной зоны Черного моря на Адлерской опытной станции – филиале ВИР (43.450° N, 39.933° E).

стика (среднее, минимум и максимум) признака DTF по годам (2023–2025) выполнена в программном пакете Excel.

Данные генотипирования

Выделение геномной ДНК производилось из листьев 14-дневных растений с использованием набора DNeasy-PlantMiniKit (QIAGEN, Венло, Нидерланды, Cat. No. 69106) в соответствии с инструкцией производителя.

[1] Приложение Таблица S1 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-2-o3 / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 1. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-2-o3



a b

Рис. 2. Погодные условия проведения опыта
(Адлерская опытная станция – филиал ВИР, Краснодарский край, 2023–2025 гг.)

Fig. 2. Weather conditions during the experiment (Adler Experiment Station of VIR, Krasnodar Territory, 2023–2025)

Генотипирование проведено методом высокопроизводительного секвенирования (GBS) в рамках реализации программы Центра «Агротехнологии будущего» ВИР. Секвенирование осуществлялось в научно-исследовательском центре «Курчатовский институт». После строгого контроля качества (частота минорных аллелей MAF > 0,05, частота делеции генотипа < 20%) в конечном итоге было получено 20 620 высококачественных локусов SNP. Во всех образцах регистрировалась низкая доля гетерозиготных генотипов (в среднем 0,025% от числа SNP), что соответствует уровню самоопыления у сои.

Популяционная структура

Анализ популяционной структуры исследуемой выборки сои рассчитывался с помощью программного пакета STRUCTURE v 2.3.4 (Pritchard et al., 2000). Популяционная структура анализировалась на основе данных генотипирования набора из 20 620 маркеров. Чтобы рассчитать количество популяций (K), использовалась смешанная модель (admixture model) с коррелирующими частотами аллелей. Длину периода разогрева (burn-in) задавали равной 5000 итерациям, которые исключали из анализа для достижения стационарного распределения, после чего выполняли еще 5000 повторов марковской цепи Монте-Карло (MCMC) для получения окончательных оценок параметров.

Для определения числа популяций использовали: анализ графика логарифмической зависимости logPr(X|K) от числа кластеров K (Pritchard et al., 2000). Величина logPr(X|K) представляет собой оценку логарифма правдоподобия наблюдаемых данных при фиксированном числе популяционных кластеров K; по изменению этого показателя судили о том, какое значение K лучше описывает структуру выборки. Дополнительно оптимальное значение K оценивали с использованием критерия ΔK, отражающего максимум изменения logPr(X|K) между соседними K (Evanno et al., 2005).

Ассоциативный анализ

После проверки нормальности распределения данных по признаку DTF данные фенотипирования включили в геномный ассоциативный анализ (GWAS), который провели с использованием программного обеспечения Tassel 5.0, реализующего смешанную линейную модель (MLM), учитывающую эффекты, обусловленные родством между сортами на основе матрицы родства. Для визуализации распределения значимости ассоциаций построили графики Q–Q plot и Manhattan plot на основе полученных значений *p*-value (Electronic Supplementary Materials, Figure S2)[2]. Для выявления значимых SNP использовали поправку на множественное тестирование: 5-процентный порог Бонферрони, установленный на уровне $2{,}4*10^{-6}$, то есть уровень значимости (0,05), деленный на эффективное количество независимых тестов (20 620) (Sobota et al., 2015). Таким образом, в качестве порога значимости использовался $-\log10(p\text{-value}) = 5{,}6$. Кроме того, был установлен предполагаемый порог $p < 10^{-4}$ для выявления маркеров с достаточно низким значением *p*-value, но не достигших порогового уровня статистической значимости.

Результаты

Фенотипирование

Погодные условия вегетационного периода характеризовались умеренными отклонениями от многолетних температурных норм и заметными колебаниями количества осадков по месяцам относительно многолетней нормы (см. рис. 2).

Такие условия вегетации позволили оценить вклад генотипа и среды в формирование исследуемого признака. В таблице 1 указаны основные статистические показатели для признака DTF по трем годам наблюдений: среднее значение со стандартным отклонением, а также минимальные и максимальные значения, отражающие межгодовую изменчивость – от 18 до 73 дней в 2023 г., от 20 до 70 дней в 2024 и от 21 до 68 дней в 2025 г. Среднее время до цветения (DTF) в 2025 г. – 41 день, в 2023 и 2024 г. – 35 дней. Выявленный широкий диапазон значений (18–73 дня) для продолжительности межфазного периода от всходов до цветения отражает генетическое и адаптационное разнообразие изучаемых образцов (см. табл. 1; рис. 3). Распределение по количеству генотипов, начавших цветение в различное время после всходов, представлено на рисунке 4. Данные по признаку DTF использовались далее в ассоциативном анализе отдельно за каждый год наблюдений, без усреднения.

Популяционная структура

Исследование структуры популяции проведено в программе Structure v 2.3.4 (Pritchard et al., 2000). Проанализирована структура популяции 169 образцов сои из раз-

[2] Приложение Рисунок S2 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-2-o3 / Electronic Supplementary Materials, Figure S2. The online version of this article: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-2-o3

Таблица 1. Описательная статистика по признаку «дни до цветения» (DTF) по годам изучения
Table 1. Descriptive statistics for the days-to-flowering (DTF) character across the years of research

Признак / Character	2023			2024			2025		
	Mean ± SD	Min	Max	Mean ± SD	Min	Max	Mean ± SD	Min	Max
DTF	34,8 ± 10,2	18	73	34,7 ± 11,7	20	70	41,6 ± 14,1	21	68

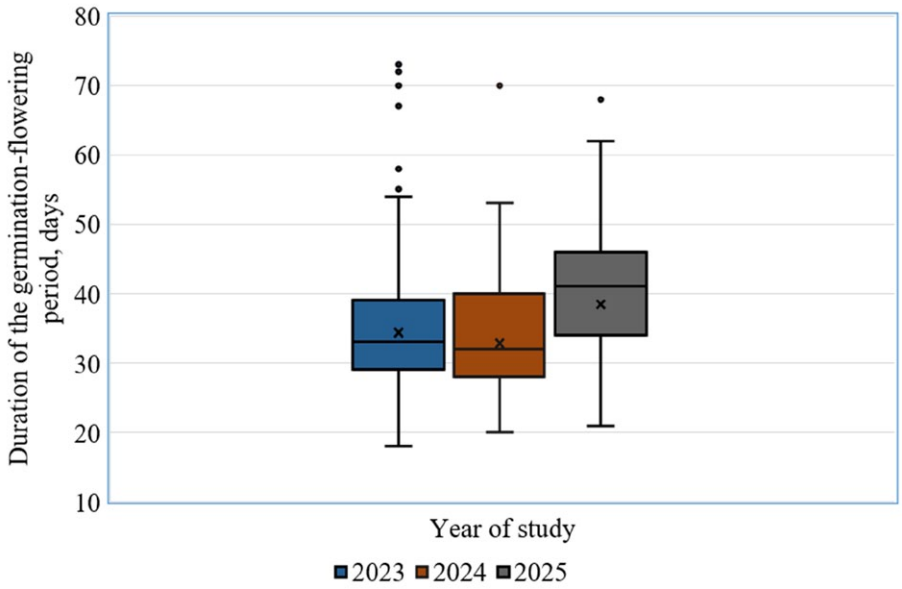


Рис. 3. Изменчивость продолжительности периода от всходов до цветения у образцов сои в 2023–2025 гг.
Диаграмма размаха, показывающая межквартильный размах (расстояние от нижней границы ящика, Q1, до верхней границы, Q3), медиану (горизонтальная линия внутри прямоугольника), среднее значение (×), минимальные и максимальные значения выбросов (усы), индивидуальные выбросы за пределами межквартильного размаха (точки)

Fig. 3. Variability of the germination-to-flowering period duration in soybean accessions in 2023–2025.
Box plot showing the interquartile range (distance from the lower edge of the box, Q1, to the upper edge, Q3), the median (horizontal line inside the rectangle), the mean (×), the minimum and maximum non-outlier values (whiskers), and individual outliers beyond the interquartile range (dots)

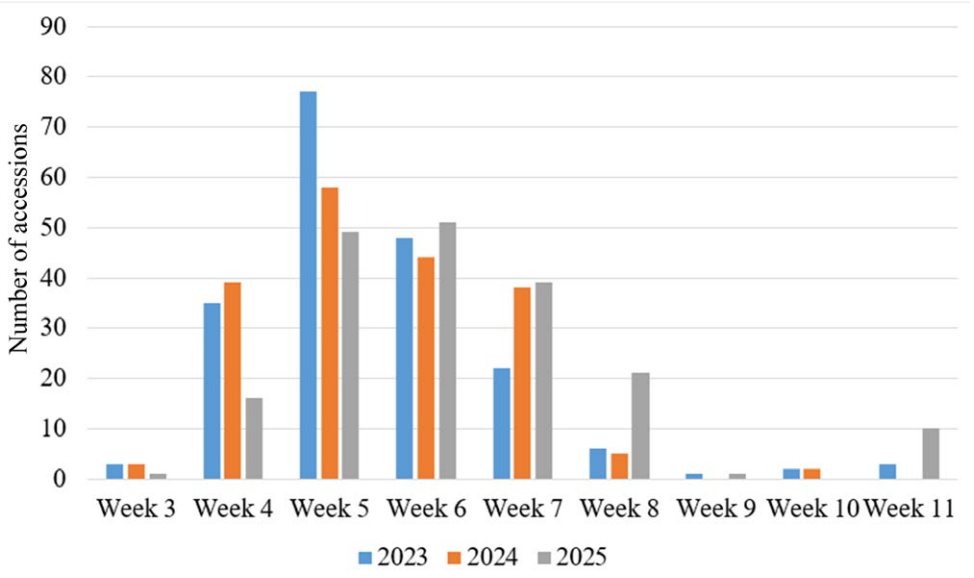


Рис. 4. Распределение образцов по неделям наступления цветения после всходов в 2023–2025 гг.
Fig. 4. Distribution of accessions over the weeks of the onset of flowering after germination in 2023–2025

ных стран для каждого числа субпопуляций K от 2 до 10 (рис. 5). Для выбора оптимального количества K использовались два независимых критерия. Анализ кластеров вероятности [LnP(D)] показал формирование «плато» начиная с K = 4…6, после чего дальнейшее увеличение числа кластеров не добавило информативности. После K = 9 существенной структуры в данных не наблюдается (см. рис. 5, a).

Для более точного определения количества кластеров применялся метод ΔK Эванно (Evanno et al., 2005), согласно которому первый выраженный локальный максимум принимается за наиболее вероятное число субпопуляций в выборке. Пик ΔK наблюдался при K = 6. При дальнейшем увеличении значения K последующие колебания ΔK рассматриваются как вторичные и не отражают появления новой устойчивой структуры (см. рис. 5, b).

В последующем анализе структуры популяции использовался диапазон значений K = 6, как показано на рисунке 6. Анализ структуры популяции выявил наличие примесей всех однородных полиморфных локусов в различных кластерах, что свидетельствует о сложной родословной исследуемых образцов сои (см. рис. 6).

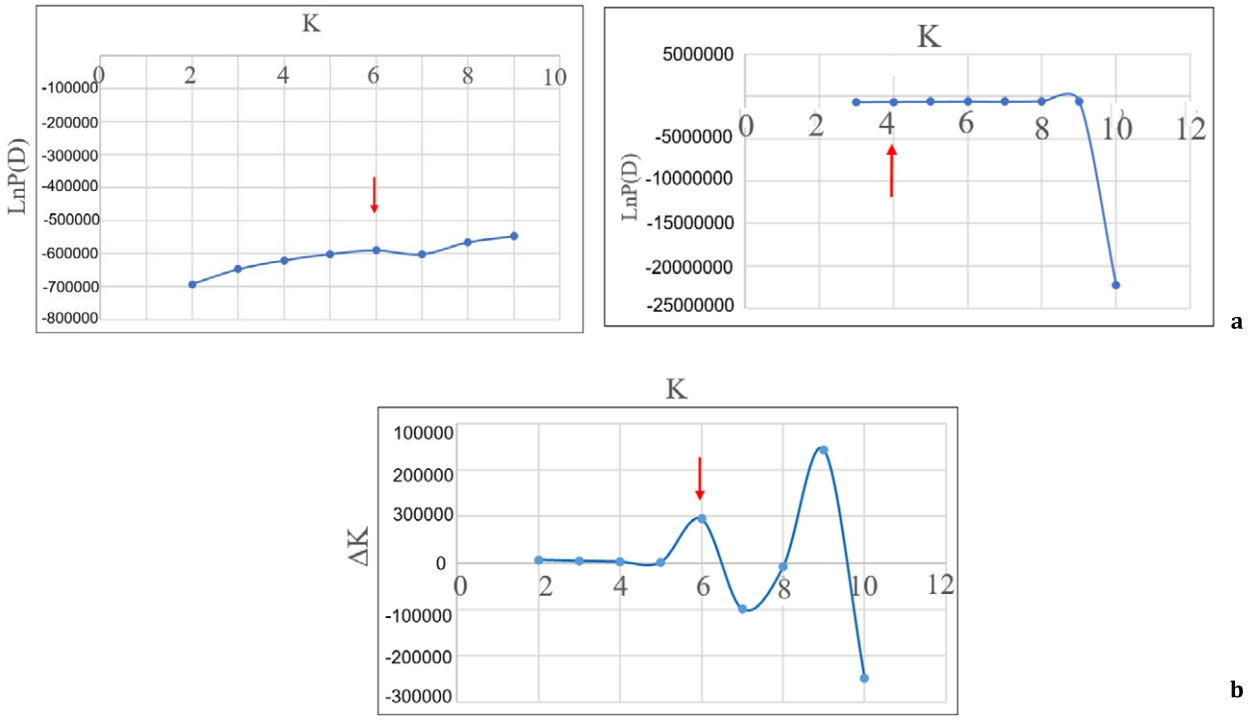


Рис. 5. Графики, показывающие оптимальное количество субпопуляций в изучаемой выборке сои. Стрелки указывают наилучшее значение K; **a)** анализ кластеров вероятности [LnP(D)]; **b)** определение кластеров по методу ΔK Эванно

Fig. 5. Plots showing the optimal number of subpopulations in the studied set of soybean accessions. The arrows indicate the best value of K; **a)** probability cluster analysis [LnP(D)]; **b)** clustering by the Evanno ΔK method

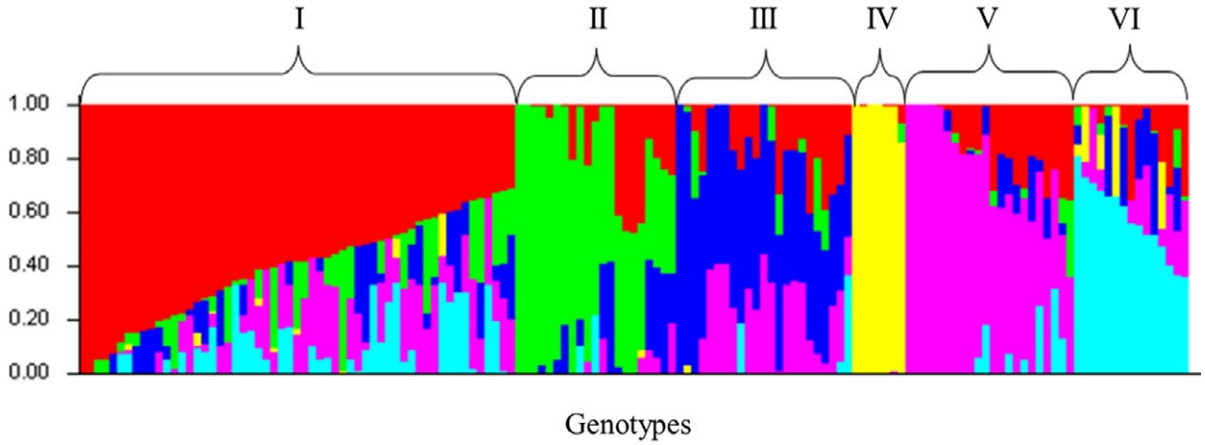


Рис. 6. Столбчатая диаграмма распределения генотипов выборки сои при K = 6 на основе 20620 SNP. Разные цвета представляют разные кластеры. Каждая вертикальная полоса представляет собой отдельный образец, полоса разделена на пропорции, основанные на доле частот аллелей, соответствующей каждой генетической группе

Fig. 6. Bar plots of the distribution in the studied set of soybean genotypes at K = 6, based on 20620 SNPs. Different colors represent different clusters. Each vertical bar represents an individual accession; bars are divided into proportions based on the share of allele frequencies corresponding to each genetic group

Использование параметров, полученных с помощью анализа популяционной структуры, в качестве ковариат в моделях GWAS позволяет исключить эффект, обусловленный популяционным происхождением.

Ассоциативный анализ

Графики Q–Q plot показали различия в количестве выявленных значимых SNP и в распределении значений *p*-value, что хорошо отражает влияние окружающей среды на результаты GWAS (рис. 7).

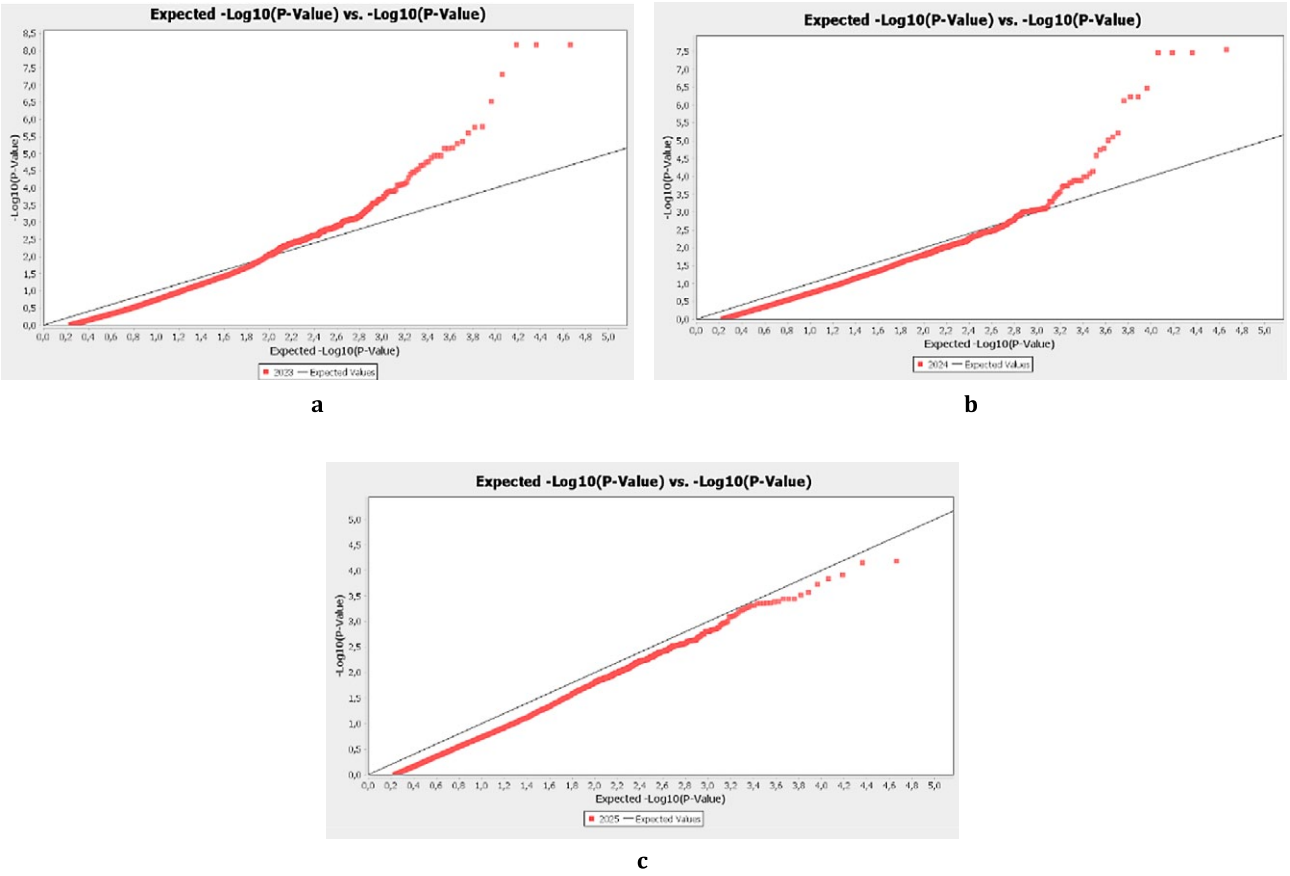


Рис. 7. Графики Q–Q plot продолжительности периода от всходов до цветения (DTF):
a – 2023; **b** – 2024; **c** – 2025 год

Fig. 7. Q–Q plots of the germination-to-flowering period duration (days to flowering, DTF): a – 2023; **b** – 2024; **c** – 2025

Результаты за 2023 и 2024 г. более информативны: на графиках наблюдается четко выраженное отклонение верхних точек от диагонали, что указывает на наличие значимых маркеров. График Q–Q plot за 2025 г. показывает точечное распределение с минимальным отклонением, что говорит об отсутствии значимых SNP. Вероятно, на такой результат повлияли погодные условия: 2025 г. на фоне остальных отличался выраженным избытком осадков в июне и одновременным дефицитом в июле, что привело к сглаживанию фенотипических различий между генотипами.

В итоге ассоциативный анализ выявил 48 маркеров на 14 хромосомах, ассоциированных с признаком «дни до цветения» (DTF) (табл. 2).

Обсуждение

В текущем исследовании мы проанализировали выборку образцов сои из коллекции ВИР. Использование ресурсов доступного генетического разнообразия представляет собой перспективное направление, которое обеспечивает ценный источник новых локусов, контролирующих срок цветения.

В нашей работе была сформирована выборка сои из образцов разного регионального происхождения, включавшая как местные формы, так и селекционные сорта, созданные в различные периоды прошлого и нынешнего веков. Также для сравнения были добавлены образцы *G. gracilis* и *G. soja*. Такой подход позволил получить выборку с высоким уровнем гетерогенности, что дает основания ожидать, что данные, полученные в работе, будут новыми и достоверными.

Выявленные по результатам GWAS локусы, ассоциированные со временем цветения, были нанесены на хромосомную карту. Дополнительно на карту были нанесены гены и QTL, описанные ранее в литературе как ассоциированные с цветением на соответствующих хромосомах, и «якорные маркеры», то есть маркеры, которые имеют точное, максимально близкое положение на хромосоме, полученное с помощью ресурса SoyBase (https://www.soybase.org) (рис. 8). В настоящее время известно 12 классических генов, связанных с цветением и созреванием у сои (*E1–E11* и *J*), а также гены *GmAP1a*, *GmAP1d* и *GmFTIP09*. Под «классическими генами» в данном контексте подразумевается гены, определяющие признаки путем наследования по законам Менделя, без исследования молекулярных механизмов.

На хромосоме 1 отсутствуют классические гены *E* (*E1–E11*), однако в ее регионах идентифицированы гены, влияющие на циркадные ритмы и фотопериодическую

Таблица 2. **SNP-маркеры, ассоциированные с признаком «дни до цветения» (DTF)**
Table 2. **SNP markers associated with the days-to-flowering (DTF) character**

Название маркерного локуса / Name of the marker locus (SNP)	Chr	Позиция, пн / Position, bp	Позиция, cM[b] / Position, cM[b]	*p*-value –log10[a]	Аллель / Allele	MAF	Эффекторный аллель / Effector allele[c]
SNC_016088.4_3857705 [2023, 2024]	1	3857705	49.8	6.49	C/A	0.1	(C)↓
SNC_016088.4_56332376 [2023, 2024]	1	56332376	115	7.33	G/A	0.12	(A)↑
SNC_016089.4_6649740 [2023, 2024]	2	6649740	29	7.47	T/C	0.1	(C)↑
SNC_016089.4_11057744 [2023*]	2	11057744	44	5.45	A/T	0.25	(T)↑
SNC_016089.4_12439788 [2023*]	2	12439788	50	4.07	G/A	0.29	(A)↓
SNC_016089.4_42976100 [2023*]	2	42976100	97	4.06	T/C	0.14	(C)↑
SNC_016089.4_42976210 [2023*, 2024*]	2	42976210	97	4.71	C/T	0.14	(T)↑
SNC_016089.4_42976228 [2023*, 2024*]	2	42976228	97	4.71	T/C	0.14	(C)↑
SNC_016091.4_9121348 [2023*, 2024*]	4	9121348	71	5.23	T/G	0.22	(G)↓
SNC_016091.4_42679481 [2023, 2024*]	4	42679481	76	5.68	A/G	0.24	(G)↓
SNC_038241.2_398023 [2023, 2024]	5	398023	1	6.51	A/T	0.25	(T)↓
SNC_038241.2_3868513 [2023, 2024*]	5	3868513	3	5.59	T/A	0.12	(A)↓
SNC_038241.2_3883871 [2023*]	5	3883871	3	4.27	T/A	0.24	(A)↓
SNC_038242.2_10830042 [2024*]	6	10830042	63	4.04	T/C	0.21	(C)↑
SNC_038242.2_11739905 [2024*]	6	11739905	70	4.01	C/T	0.15	(T)↑
SNC_038242.2_44649723 [2023, 2024*, 2025*]	6	44649723	117	6.21	G/A	0.11	(A)↑
SNC_038242.2_44649758 [2023*, 2024*, 2025*]	6	44649758	117	5.09	G/A	0.49	(A)↓
SNC_038243.2_4863854 [2023, 2024, 2025*]	7	4863854	34	7.37	G/A	0.11	(A)↑
SNC_038243.2_5045449 [2024*]	7	5045449	36	5.34	C/T	0.15	(T)↑
SNC_038243.2_44621865 [2023, 2024, 2025*]	7	44621865	140	7.3	G/A	0.18	(A)↑
SNC_038244.2_7804208 [2023*, 2024*]	8	7804208	51	4.63	A/G	0.18	(G)↓
SNC_038244.2_8259265 [2023*, 2024*]	8	8259265	51	5.57	C/G	0.1	(G)↓
SNC_038244.2_8927481 [2024*]	8	8927481	51	4.14	G/A	0.14	(A)↑
SNC_038244.2_14450708 [2023*]	8	14450708	83	5.5	C/T	0.1	(T)↑
SNC_038244.2_14450763 [2023*]	8	14450763	83	5.5	A/G	0.1	(G)↑
SNC_038244.2_14450797 [2023*]	8	14450797	83	5.5	C/T	0.1	(T)↑
SNC_038244.2_37316051 [2023, 2024]	8	37316051	117	5.96	G/A	0.12	(A)↑
SNC_038244.2_40375184 [2023, 2024]	8	40375184	116	6.85	G/A	0.14	(G)↓
SNC_038244.2_40375533 [2023, 2024, 2025*]	8	40375533	116	7.23	C/T	0.2	(C)↓
SNC_038245.2_994445 [2023, 2024]	9	994445	0	7.44	A/C	0.1	(C)↑
SNC_038245.2_44083476 [2023, 2024]	9	44083476	81.48	7.32	A/G	0.07	(G)↑
SNC_038245.2_44083655 [2023, 2024]	9	44083655	81.48	7.32	G/A	0.07	(A)↑
SNC_038245.2_44083659 [2023, 2024]	9	44083659	81.48	7.32	A/G	0.07	(G)↑

Таблица 2. **SNP-маркеры, ассоциированные с признаком «дни до цветения» (DTF)**
Table 2. **SNP markers associated with the days-to-flowering (DTF) character**

Название маркерного локуса / Name of the marker locus (SNP)	Chr	Позиция, пн / Position, bp	Позиция, cM[b] / Position, cM[b]	*p*-value –log10[a]	Аллель / Allele	MAF	Эффекторный аллель / Effector allele[c]
SNC_038246.2_4725027 [2023, 2024*]	10	4725027	38.09	5.23	G/C	0.08	(C)↑
SNC_038246.2_39936162 [2023, 2024]	10	39936162	74.05	6.38	C/A	0.18	(A)↑
SNC_038246.2_42322144 [2024*]	10	42322144	95.74	4.8	C/A	0.11	(A)↑
SNC_038246.2_42322275 [2024*]	10	42322275	95.74	4.8	A/T	0.11	(T)↑
SNC_038249.2_24665912 [2023*, 2024*]	13	24665912	50.24	4.08	T/C	0.17	(C)↓
SNC_038249.2_44235606 [2023*, 2024*]	13	44235606	142	5.26	C/T	0.12	(T)↑
SNC_038250.2_5720325 [2023*]	14	5720325	34	4.43	A/G	0.21	(G)↑
SNC_038250.2_5720640 [2023*]	14	5720640	34	4.12	A/G	0.2	(G)↑
SNC_038253.2_2895066 [2023, 2024]	17	2895066	11.77	6.55	C/G	0.16	(G)↑
SNC_038253.2_2895119 [2023, 2024]	17	2895119	11.77	7.59	G/A	0.15	(A)↑
SNC_038254.2_7324797 [2023, 2024*]	18	7324797	41.24	5.84	T/A	0.27	(A)↓
SNC_038255.2_2857271 [2023, 2024]	19	2857271	19	6.26	G/C	0.11	(C)↑
SNC_038255.2_2857305 [2023, 2024]	19	2857305	19	8.41	T/C	0.12	(C)↑
SNC_038255.2_2857479 [2023, 2024]	19	2857479	19	8.41	T/A	0.12	(A)↑
SNC_038255.2_2857525 [2023, 2024*]	19	2857525	19	8.41	G/A	0.12	(A)↑

Примечание: [a] – указан отрицательный десятичный логарифм наименьшего из полученных значений *p*-value; [b] – генетические позиции были определены с использованием электронного ресурса SoyBase (www.soybase.org); [c] – эффекторный аллель, ассоциированный со сроком цветения; ↓ – укорачивает время до цветения, ↑ – увеличивает время до цветения; * – предполагаемый (значения достаточно низкие, но не превышающие пороговое)

Note: [a] – the negative decimal logarithm of the smallest among the obtained *p*-values is indicated; [b] – the genetic positions were identified using the SoyBase electronic resource (www.soybase.org); [c] is an effector allele associated with the flowering period; ↓ – shortens the days to flowering, ↑ – extends the days to flowering; * – expected (values are low enough, but not exceeding the threshold)

индукцию цветения. Гены *GmAP1a* и *GmAP1d* (гомологи *AP1* и *FUL* у *Arabidopsis thaliana*) расположены в области 44–46 cM и участвуют в индукции цветения через путь SOC1/FT. В настоящей работе выявлены два локуса на позициях ~49,8 cM и ~115 cM. Первый из них совпадает с областью, описанной ранее в литературе (Yang et al., 2017; Guo et al., 2024), тогда как второй локус идентифицирован впервые. Оба локуса стабильно выявлялись два года подряд.

На второй хромосоме обнаружено 6 SNP, сгруппированных в три геномных района: ~29,2 cM, 43,19–53,02 cM и ~97 cM. Несмотря на отсутствие генов *E* на хромосоме 2, ранее сообщалось о наличии QTL, ассоциированных с цветением (Yang et al., 2017). Ген *Glyma.02G139200*, являющийся ортологом гена *PFT1/MED25* у *Arabidopsis*, локализуется в позиции 59,61 cM и участвует в регуляции экспрессии *CONSTANS* через взаимодействие с *E2*. В нашем исследовании обнаружен локус, расположенный всего в 6 cM от *Glyma.02G139200*, что свидетельствует о возможном сходстве регуляторных механизмов.

На хромосоме 4 расположены важные гены *J* (*GmELF3*) (~42,9 cM) (Lu et al., 2017) и *E8*, картированный между маркерами Sat_404 и Satt136 (приблизительно 73,84–75,11 cM) (Cober et al., 2010). Оба локуса участвуют в регуляции цветения и продолжительности репродуктивного периода (Samanfar et al., 2017; Kong et al., 2018). В нашем исследовании обнаружено 2 локуса на хромосоме 4 в позициях 71 cM и 76 cM. Оба локуса проявлялись 2 года из трех лет исследования.

Классических генов, регулирующих цветение, на хромосоме 5 не выявлено. В нашем исследовании обнаружен значимый локус в позиции 1–3 cM, включающий 4 SNP, которые проявлялись в течение двух лет.

Хромосома 6 содержит основной регулятор цветения сои – локус *E1*. Он расположен в перицентромерной области этой хромосомы. Согласно опубликованным данным (Xia et al., 2012), *E1* картирован рядом с маркером Satt365 на расстоянии 0,1 cM, что по карте SoyBase (LG C2) (www.soybase.org) соответствует позиции 111,68 cM. Локус *E1* кодирует B3-содержащий транскрипционный фактор, который подавляет экспрессию генов *GmFT2a* и *GmFT5a* и тем самым задерживает наступление цветения (Tsubokura et al., 2014). Рядом с *E1*, на расстоянии около 6,2 cM, расположен локус *E7*, картированный между мар-

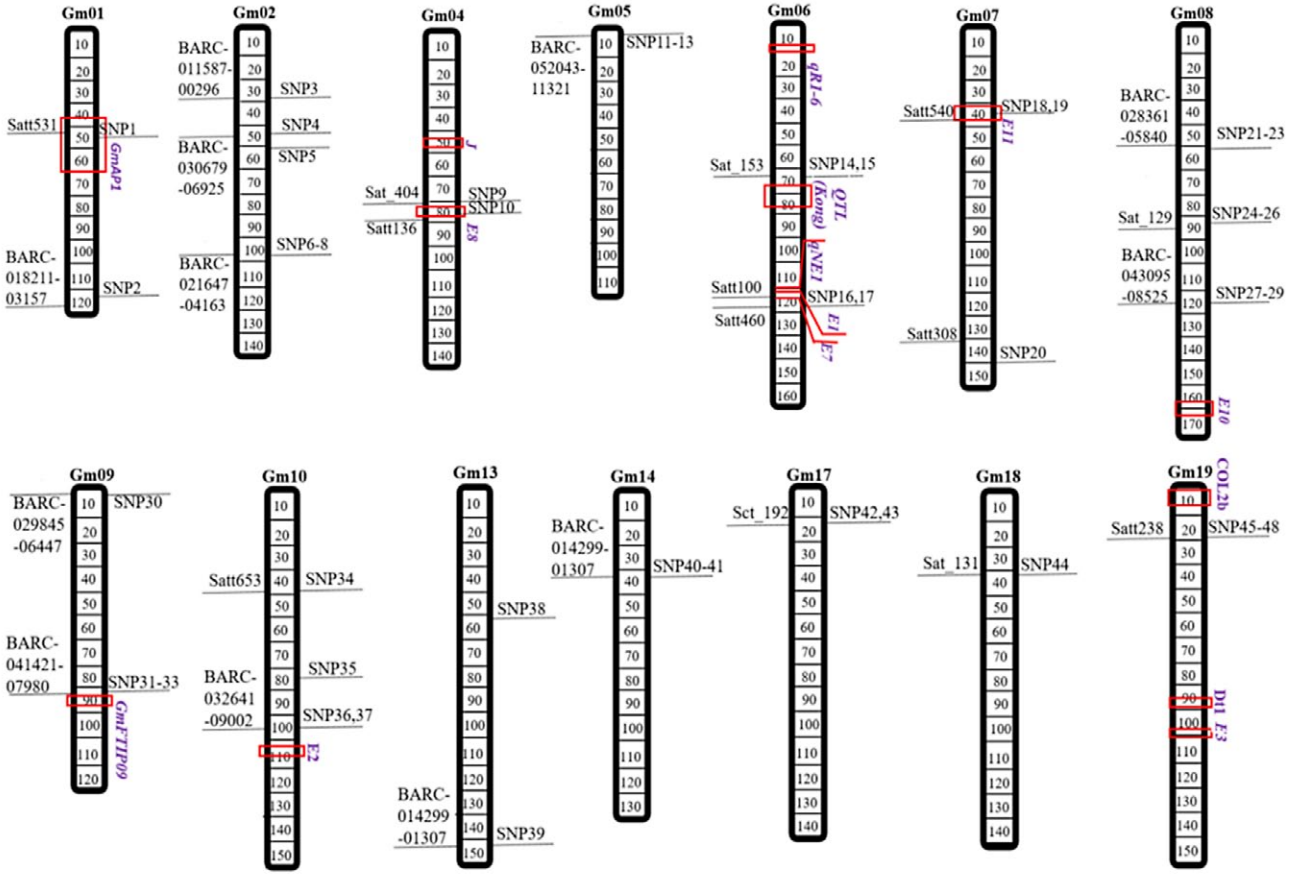


Рис. 8. Локализация геномных районов, выявленных в настоящей работе и ассоциированных с цветением.
С левой стороны хромосомы нанесены якорные маркеры по базе SoyBase (www.soybase.org). С правой стороны от хромосом показаны SNP-маркеры, ассоциированные со временем цветения и выявленные в работе. Ранее описанные в литературе локусы нанесены справа фиолетовым цветом, а места их локализации отмечены красными квадратами

Fig. 8. Localization of genomic regions identified in this study and associated with flowering.
Anchor markers from the SoyBase database (www.soybase.org) are plotted on the left side of the chromosome. SNP markers associated with flowering time and identified in the study are shown on the right side of the chromosome. Previously reported loci are plotted in purple on the right, and their locations are marked with red squares

керами Satt100 (113,95 cM), Satt319 (113,41 cM) и Satt460 (117,76 cM), вовлеченный в задержку цветения при длинном дне (Cober, Voldeng, 2001). Помимо классических генов, на хромосоме 6 описаны дополнительные QTL, такие как *qNE1* (кандидатом для которого рассматривается ген *Glyma.06G204300*; ~110,84 cM) (Xia et al., 2022) и *qR16* в интервале 8,60–9.22 cM (Yang et al., 2017). Ранее в области 77,66–87,4 cM идентифицировали достоверный QTL, для которого в качестве кандидатов были предложены гены: *Glyma.06G238800*, *Glyma.06G239700*, *Glyma.06G241900*, *Glyma.06G242100* и *Glyma.06G248100*, ассоциированные с фотопериодической регуляцией цветения (Kong et al., 2018). В настоящем исследовании выявлены два значимых локуса на хромосоме 6: в интервале 63–70,55 cM и в позиции 117,87 cM, при этом локус в районе 117 cM стабильно выявлялся во все три года наблюдений, что подчеркивает его связь с исследуемым признаком.

На хромосоме 7 локализован локус *E11* (30–38 cM), который идентифицировали сравнительно недавно и ассоциировали его с ранним цветением и созреванием в условиях длинного дня. Этот локус играет важную роль в регуляции цветения и функционирует независимо от *E1* (Wang F. et al., 2019). В нашем исследовании выявлены два достоверных локуса на противоположных дистальных участках хромосомы 7 – приблизительно в интервалах 34 cM и 140 cM. При этом локус, обнаруженный в позиции около 34 cM, полностью совпадает с описанной ранее хромосомной локализацией *E11*.

На хромосоме 8 картирован локус *E10* (168–171 cM), ассоциированный со сроком созревания сои. В качестве гена-кандидата для локуса *E10* предложен *FT4* (*Glyma.08g363100*), экспрессия которого зависит от гена *E1* и возрастает при его активации. Ген *FT4* секвенирован, в четвертом экзоне выявлена замена C→T, приводящая к аминокислотной замене треонина на изолейцин, вследствие чего изменяются свойства белка. Аллель *e10* ассоциирован с более ранним наступлением цветения и созревания по сравнению с *E10*, что, вероятно, связано с измененной регуляцией экспрессии *FT4* (Samanfar et al., 2017). В данном исследовании выявлено 9 маркеров, распределенных по трем геномным участкам (~51 cM; ~83 cM; 116–117 cM), однако они не совпали с картированной областью локуса *E10*.

На хромосоме 9, согласно Chen Lei с соавторами, локализован ген *GmFTIP09* (81,48-85,19 cM), который регулирует время цветения и массу семян (Chen et al., 2025). В нашем исследовании обнаружено два геномных рай-

она на противоположных концах хромосомы (0–1,46 cM и 81,48 cM). Один локус новый, а второй совпадает с положением известного *GmFTIP09.*

На хромосоме 10 расположен ключевой элемент регуляции цветения – локус *E2* (*Glyma.10g221500*, *GmGIa*) на интервале ~102–105 cM. Этот ген является ортологом гена *Arabidopsis GIGANTEA* (Watanabe et al., 2011), контролирует чувствительность к длине дня и при удлиненном световом дне способствует более позднему наступлению фазы цветения. В нашем исследовании значимые ассоциации выявлены в трех интервалах данной хромосомы: около 38 cM; 74,05 и 94,69 cM, причем только последний локус находится относительно недалеко от картированного E2.

На хромосоме 17 классические гены, контролирующие срок цветения, отсутствуют. В нашем исследовании выявлены два маркера в геномном локусе 11,77 cM.

На хромосоме 19 локализуются важные гены *E3* (*GmPhyA3*; 97,28-100,53 cM) и *Dt1* (*Glyma.19G194300*; 87,41–89,22 cM), участвующие в регуляции реакции на свет и формировании соцветия (Kong et al., 2018). Там же, в верхней части хромосомы 19 (0–5 cM), расположен ген *COL2b* (*Glyma.19G039000*), который участвует в регуляции цветения в ответ на низкие температуры окружающей среды (Zhang et al., 2020). В настоящем исследовании выявлен один геномный район в позиции ~19 cM, который не перекрывается ни с одним из ранее описанных регионов.

Анализ структуры популяции показал, что лучшее разбиение по кластерам наблюдается при K = 6, что подтверждает сложную структуру популяции в исследуемой выборке.

Итого в результате GWAS выявлены SNP-маркеры, распределенные по 14 хромосомам, среди которых присутствуют как известные QTL, ассоциированные с генами регуляции цветения, так и потенциально новые локусы, уникальные для исследованной выборки образцов из коллекции ВИР. Данная работа показала успешность метода GWAS с применением GBS для анализа сложного количественного признака. В то же время идентификация новых участков, ассоциированных с исследуемым признаком, на хромосомах Gm1, Gm6 и Gm9 позволяет предположить наличие дополнительных регуляторных элементов, участвующих в контроле перехода к цветению. Выявлены новые регионы на хромосомах Gm1: локус в позиции около 115 cM, который не описывался ранее и выявлялся стабильно два года подряд; Gm5: значимый локус в интервале 1–3 cM, проявлявшийся два года; Gm6: локус в интервале 63–70,55 cM и локус в районе 117 cM, стабильно выявлявшийся все три года (возможно, расширяет уже известный регион вокруг E7); Gm8 (116 cM); Gm19: локус в позиции около 19 cM, которые ранее не описывались в литературе и могут включать гены, участвующие в регуляции цветения.

Заключение

В данном исследовании проведен полногеномный анализ ассоциаций образцов сои из коллекции ВИР, объединяющий данные генотипирования методом GBS и трехлетнего полевого фенотипирования. В результате выявлены значимые SNP, ассоциированные с локусами регуляции сроков цветения на 14 хромосомах, в том числе и три локуса, ранее указанные в литературе. Также выявлены новые регионы на хромосомах Gm1 (локус в позиции около 115 cM), Gm5 (1–3 cM), Gm6 (63–70,55 cM и локус в районе 117 cM), Gm8 (116 cM), Gm19 (19 cM), которые ранее не описывались и могут включать гены, участвующие в регуляции цветения. Полученные SNP-маркеры обладают практической ценностью для дальнейших селекционных программ, позволяя оптимизировать отбор по агрономическим признакам без длительных скрещиваний.

References / Литература

Bhat J.A., Yu D. High-throughput NGS-based genotyping and phenotyping: Role in genomics-assisted breeding for soybean improvement. *Legume Science*. 2021;3(3):e81. DOI: 10.1002/leg3.81

Chen L., Chen J., Liu C., Li H., You M., Chen Q. et al. *GmFT-IP09* regulated flowering time and seed weight. *Frontiers in Plant Science*. 2025;16:1640116. DOI: 10.3389/fpls.2025.1640116

Cober E.R., Molnar S.J., Charette M., Voldeng H.D. A new locus for early maturity in soybean. *Crop Science*. 2010;50(2):524-527. DOI: 10.2135/cropsci2009.04.0174

Cober E.R., Voldeng H.D. Low R:FR light quality delays flowering of *E7E7* soybean lines. *Crop Science*. 2001;41(6):1823-1826. DOI: 10.2135/cropsci2001.1823

Evanno G., Regnaut S., Goudet J. Detecting the number of clusters of individuals using the software STRUCTURE: a simulation study. *Molecular Ecology*. 2005;14(8):2611-2620. DOI: 10.1111/j.1365-294X.2005.02553.x

Fedorina J.V., Khlestkina E.K., Seferova I.V., Vishnyakova M.A. Genetic mechanisms underlying the expansion of soybean *Glycine max* (L.) Merr. cultivation to the north. *Ecological Genetics*. 2022;20(1):13-30. [in Russian] (Федорина Я.В., Хлесткина Е.К., Сеферова И.В., Вишнякова М.А. Молекулярно-генетические механизмы, лежащие в основе продвижения ареала возделывания сои к северу. *Экологическая генетика*. 2022;20(1):13-30). DOI: 10.17816/ecogen83879

Guo S., Li Y., Qiu H., Hu G., Zhao C., Wang R. et al. *GmAP1d* regulates flowering time under long-day photoperiods in soybean. *The Crop Journal*. 2024;12(3):845-855. DOI: 10.1016/j.cj.2024.03.004

Kong L., Lu S., Wang Y., Fang C., Wang F., Nan H. et al. Quantitative trait locus mapping of flowering time and maturity in soybean using next-generation sequencing-based analysis. *Frontiers in Plant Science*. 2018;9:995. DOI: 10.3389/fpls.2018.00995

Lu S., Zhao X., Hu Y., Liu S., Nan H., Li X, et al. Natural variation at the soybean J locus improves adaptation to the tropics and enhances yield. *Nature Genetics*. 2017;49(5):773-779. DOI: 10.1038/ng.3819

Menkov M.T., Rozanova I.V., Evlash A.Ya., Khlestkina E.K. Next-generation sequencing in soybean breeding and genetic research. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(4):252-263. [in Russian] (Меньков М.Т., Розанова И.В., Евлаш А.Я., Хлесткина Е.К. NGS-секвенирование в селекционно-генетических исследованиях сои. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(4):252-263). DOI: 10.30901/2227-8834-2024-4-252-263

Novikova L.Yu., Seferova I.V., Nekrasov A.Yu., Perchuk I.N., Shelenga T.V., Samsonova M.G. et al. Impact of weather and climate on seed protein and oil content of soybean in the North Caucasus. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2018;22(6):708-715. [in Russian] (Новикова Л.Ю., Сеферова И.В., Некрасов А.Ю., Перчук И.Н., Шеленга Т.В., Самсонова М.Г. и др. Влияние погодно-климатических усло-

вий на содержание белка и масла в семенах сои на Северном Кавказе. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2018;22(6):708-715). DOI: 10.18699/VJ18.414

Poland J.A., Rife T.W. Genotyping-by-sequencing for plant breeding and genetics. *The Plant Genome*. 2012;5(3):92-102. DOI: 10.3835/plantgenome2012.05.0005

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

Qin C., Li Y.H., Li D., Zhang X., Kong L., Zhou Y. Et al. PH13 improves soybean shade traits and enhances yield for high-density planting at high latitudes. *Nature Communications*. 2023;14(1):6813. DOI: 10.1038/s41467-023-42608-5

Rozanova I.V., Grigoriev Y.N., Efimov V.M., Igoshin A.V., Khlestkina E.K. Genetic dissection of spike productivity traits in the Siberian collection of spring barley. *Biomolecules*. 2023;13(6):909. DOI: 10.3390/biom13060909

Samanfar B., Molnar S.J., Charette M., Schoenrock A., Dehne F., Golshani A. et al. Mapping and identification of a potential candidate gene for a novel maturity locus, E10, in soybean. *Theoretical and Applied Genetics*. 2017;130(2):377-390. DOI: 10.1007/s00122-016-2819-7

Schmutz J., Cannon S.B., Schlueter J., Ma J., Mitros T., Nelson W. et al. Genome sequence of the palaeopolyploid soybean. *Nature*. 2010;463(7278):178-183. DOI: 10.1038/nature08670

Sobota R.S., Shriner D., Kodaman N., Goodloe R., Zheng W., Gao Y.T. et al. Addressing population-specific multiple testing burdens in genetic association studies. *Annals of Human Genetics*. 2015;79(2):136-147. DOI: 10.1111/ahg.12095

SoyBase: [website]. Available from: https://www.soybase.org [accessed Oct. 20, 2025].

Specht J.E., Diers B.W., Nelson R.L., de Toledo J.F.F., Torrion J.A., Grassini P. Soybean. In: S. Smith, B. Diers, J. Specht, B. Carver (eds). *Yield Gains in Major U.S. Field Crops. Vol. 33*. Madison, WI: American Society of Agronomy; Crop Science Society of America; Soil Science Society of America; 2015. p.311-355. DOI: 10.2135/cssaspecpub33.c12

Stupar R.M., Locke A.M., Allen D.K., Stacey M.G., Ma J., Weiss J. et al. Soybean genomics research community strategic plan: A vision for 2024–2028. *The Plant Genome*. 2024;17(4):e20516. DOI: 10.1002/tpg2.20516

Tsubokura Y., Watanabe S., Xia Z., Kanamori H., Yamagata H., Kaga A. et al. Natural variation in the genes responsible for maturity loci E1, E2, E3 and E4 in soybean. *Annals of Botany*. 2014;113(3):429-441. DOI: 10.1093/aob/mct269

Vishnyakova M.A., Seferova I.V., Buravtseva T.V., Burlyaeva M.O., Semenova E.V., Filipenko G.I., Aleksandrova T.G., Egorova G.P., Yankov I.I., Bulyntsev S.V., Gerasimova T.V., Drugova E.V. VIR global collection of grain legume crop genetic resources: replenishment, conservation and studying: (guidelines). 2nd ed. M.A. Vishnyakova (ed.). St. Petersburg: VIR; 2018. [in Russian] (Вишнякова М.А., Сеферова И.В., Буравцева Т.В, Бурляева М.О., Семенова Е.В., Филипенко Г.И., Александрова Т.Г., Егорова Г.П., Яньков И.И., Булынцев С.В., Герасимова Т.В., Другова Е.В. Коллекция мировых генетических ресурсов зерновых бобовых ВИР: пополнение, сохранение и изучение: (методические указания). 2-е изд. / под ред. М.А. Вишняковой. Санкт-Петербург: ВИР; 2018). DOI: 10.30901/978-5-905954-79-5

Wang F., Nan H., Chen L., Fang C., Zhang H., Su T. et al. A new dominant locus, E11, controls early flowering time and maturity in soybean. *Molecular Breeding*. 2019;39(5):70. DOI: 10.1007/s11032-019-0978-3

Wang L., Lin F., Li L., Li W., Yan Z., Luan W. et al. Genetic diversity center of cultivated soybean (*Glycine max*) in China – New insight and evidence for the diversity center of Chinese cultivated soybean. *Journal of Integrative Agriculture*. 2016;15(11):2481-2487. DOI: 10.1016/S2095-3119(15)61289-8

Watanabe S., Xia Z., Hideshima R., Tsubokura Y., Sato S., Yamanaka N. et al. A map-based cloning strategy employing a residual heterozygous line reveals that the *GIGANTEA* gene is involved in soybean maturity and flowering. *Genetics*. 2011;188(2):395-407. DOI: 10.1534/genetics.110.125062

Xia Z., Watanabe S., Yamada T., Tsubokura Y., Nakashima H., Zhai H. et al. Positional cloning and characterization reveal the molecular basis for soybean maturity locus E1 that regulates photoperiodic flowering. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2012;109(32):E2155-E2164. DOI: 10.1073/pnas.1117982109

Xia Z., Zhai H., Zhang Y., Wang Y., Wang L., Xu K. et al. QNE1 is a key flowering regulator determining the length of the vegetative period in soybean cultivars. *Science China Life Sciences*. 2022;65(12):2472-2490. DOI: 10.1007/s11427-022-2117-x

Yang G., Zhai H., Wu H.Y., Zhang X.Z., Lü S.X., Wang Y.Y. et al. QTL effects and epistatic interaction for flowering time and branch number in a soybean mapping population of Japanese×Chinese cultivars. *Journal of Integrative Agriculture*. 2017;16(9):1900-1912. DOI: 10.1016/S2095-3119(16)61539-3

Zhang J., Xu M., Dwiyanti M.S., Watanabe S., Yamada T., Hase Y. et al. A soybean deletion mutant that moderates the repression of flowering by cool temperatures. *Frontiers in Plant Science*. 2020;11:429. DOI: 10.3389/fpls.2020.00429

Информация об авторах

Михаил Тимофеевич Меньков, младший научный сотрудник, Научно-технологический университет «Сириус», Научный центр генетики и наук о жизни, 354340 Россия, Краснодарский край, федеральная территория «Сириус», пгт. Сириус, Олимпийский пр., 1, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, menkov.mt@talantiuspeh.ru, https://orcid.org/0009-0005-7915-441X

Ирина Владимировна Сеферова, 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, i.seferova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0003-3308-9198

Екатерина Анатольевна Лепилова, магистр, Научно-технологический университет «Сириус», Научный центр генетики и наук о жизни, 354340 Россия, Краснодарский край, федеральная территория «Сириус», пгт. Сириус, Олимпийский пр., 1, ek.lepilova@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0009-0455-7168

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

Александр Петрович Бойко, доктор сельскохозяйственных наук, директор, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Адлерская опытная станция – филиал ВИР, 353340 Россия, Сочи, ул. Ленина, 95, aos.vir@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1510-8546

Елена Константиновна Хлесткина, доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, руководитель направления, Научно-технологический университет «Сириус», Научный центр генетики и наук о жизни, 354340 Россия, Краснодарский край, федеральная территория «Сириус», пгт. Сириус, Олимпийский пр., 1, директор, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, director@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-8470-8254

Ирина Вениаминовна Розанова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Научно-технологический университет «Сириус», Научный центр генетики и наук о жизни, 354340 Россия, Краснодарский край, федеральная территория «Сириус», пгт. Сириус, Олимпийский пр., 1, rozanova.iv@talantiuspeh.ru, https://orcid.org/0000-0003-4341-0766

Information about the authors

Mikhail T. Menkov, Associate Researcher, Sirius University of Science and Technology, Research Center of Genetics and Life Sciences, 1 Olimpiysky Ave., Sirius Settlem., Sirius Federal Territory, Krasnodar Territory 354340, Russia, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, menkov.mt@talantiuspeh.ru, https://orcid.org/0009-0005-7915-441X

Irina V. Seferova, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, i.seferova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0003-3308-9198

Ekaterina A. Lepilova, MSc, Sirius University of Science and Technology, Research Center of Genetics and Life Sciences, 1 Olimpiysky Ave., Sirius Settlem., Sirius Federal Territory, Krasnodar Territory 354340, Russia, ek.lepilova@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0009-0455-7168

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

Alexander P. Boyko, Dr. Sci. (Agriculture), Director, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Adler Experiment Station – branch of VIR, 95 Lenina St., Sochi 353340, Russia, aos.vir@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1510-8546

Elena K. Khlestkina, Dr. Sci. (Biology), Corresponding Member of the RAS, Research Area Manager, Sirius University of Science and Technology, Research Center of Genetics and Life Sciences, 1 Olimpiysky Ave., Sirius Settlem., Sirius Federal Territory, Krasnodar Territory 354340, Russia, Director, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, director@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-8470-8254

Irina V. Rozanova, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Sirius University of Science and Technology, Research Center of Genetics and Life Sciences, 1 Olimpiysky Ave., Sirius Settlem., Sirius Federal Territory, Krasnodar Territory 354340, Russia, rozanova.iv@talantiuspeh.ru, https://orcid.org/0000-0003-4341-0766

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 01.11.2025; одобрена после рецензирования 19.12.2025; принята к публикации 08.04.2026.
The article was submitted on 01.11.2025; approved after reviewing on 19.12.2025; accepted for publication on 08.04.2026.

ГЕНЕТИКА КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 633.16:632.732
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o20

CC BY

Генетическая защита образцов ячменя из Афганистана от обыкновенной злаковой тли

Е. Е. Радченко, О. Н. Ковалева, Р. А. Абдуллаев

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

Автор, ответственный за переписку: Евгений Евгеньевич Радченко, eugene_radchenko@rambler.ru

Актуальность. Возделывание генетически защищенных сортов ячменя рассматривается как наиболее экономичный способ борьбы с обыкновенной злаковой тлей *Schizaphis graminum* Rondani. К сожалению, этот опасный фитофаг способен довольно быстро преодолевать устойчивость растений. Богатым источником пополнения запаса новых эффективных генов резистентности могут быть образцы местного ячменя, поступившие в коллекцию Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова из стран Азии.
Материалы и методы. В лабораторных опытах с помощью балловой шкалы оценили устойчивость к краснодарской популяции насекомого 65 образцов ячменя из Афганистана и семи линий, которые были выделены ранее из гетерогенных местных образцов. Кроме того, изучили сорт 'Post' (к-31204, США, защищен геном *Rsg1*) и линии, выделенные из образцов к-15903, к-15600, к-16190 (Китай), к-4080, к-3885, к-3904 (Монголия) и сорта 'Онохойский' (к-16626, Россия, Бурятия), каждая из которых имеет по одному гену устойчивости, а также выделенную из сорта 'Namji Milyang Native K647 1007' (к-28129, Северная Корея) линию, защищенную доминантным и рецессивным генами. Наследование устойчивости у линий из Афганистана изучали с помощью тест-клонов *S. graminum* и гибридологического анализа.
Результаты и выводы. Восемь гетерогенных образцов из Афганистана содержат растения с высоким уровнем устойчивости к обыкновенной злаковой тле. В результате заселения 'Post' и семи линий, выделенных из афганских образцов, 93 клонами тли выявили 29 фенотипов вирулентности *S. graminum*. Устойчивость всех линий контролируют различные аллели, отличающиеся и от идентифицированных нами ранее. Эффективность генов, которыми защищены выделенные из афганских образцов линии, в большинстве случаев низка. Устойчивы к популяции тли две линии – 20209 и 22421. У линии 22421 выявлен моногенный доминантный контроль признака.

Ключевые слова: *Hordeum vulgare* L., *Schizaphis graminum* Rondani, фенотипы вирулентности, гены устойчивости

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: Радченко Е.Е., Ковалева О.Н., Абдуллаев Р.А. Генетическая защита образцов ячменя из Афганистана от обыкновенной злаковой тли. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(2):128-136. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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.

© Радченко Е.Е., Ковалева О.Н., Абдуллаев Р.А., 2026

GENETICS OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o20

Genetic protection of Afghan barley accessions from greenbug

Evgeny E. Radchenko, Olga N. Kovaleva, Renat A. Abdullaev

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

Corresponding author: Evgeny E. Radchenko, eugene_radchenko@rambler.ru

Background. Growing genetically protected barley cultivars is considered the most cost-efficient method to control the greenbug, *Schizaphis graminum* Rondani. Unfortunately, this dangerous phytophage is capable of rapidly overcoming plant resistance. Accessions of local barleys from Asian countries that entered the collection of the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources could serve as a rich source of new effective resistance genes.
Materials and methods. Laboratory experiments were conducted to assess the resistance of 65 barley accessions from Afghanistan and 7 pure lines, isolated from heterogeneous accessions in previous studies, to the Krasnodar greenbug population using a scoring scale. The study also included cv. 'Post' (k-31204, USA, carrier of the *Rsg1* resistance gene), and lines isolated from barley landrace accessions k-15903, k-15600, k-16190 (China), k-4080, k-3885, k-3904 (Mongolia) and cv. 'Onokhoisky' (k-16626, Buryatia, Russia), each containing one gene controlling low plant damage, as well as a line isolated from cv. 'Namji Milyang Native K647 1007' (k-28129, North Korea), protected by dominant and recessive genes. Genetic control of greenbug resistance in the lines from Afghanistan was studied using aphid test clones and hybridological analysis.
Results and conclusions. Eight heterogeneous accessions from Afghanistan had plants displaying a high level of resistance to *S. graminum*. Assessing cv. 'Post' and seven lines isolated from Afghan accessions for their response to 93 aphid clones made it possible to identify 29 virulence phenotypes. All seven lines contained resistance alleles that differed from one another and from those that we had previously identified. In most cases, the efficacy of the genes protecting the lines isolated from Afghan accessions was low. Two lines, 20209 and 22421, were resistant to aphid populations. Line 22421 exhibited monogenic dominant control of the trait.

Keywords: *Hordeum vulgare* L., *Schizaphis graminum* Rondani, virulence phenotypes, resistance genes

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: Radchenko E.E., Kovaleva O.N., Abdullaev R.A. Genetic protection of Afghan barley accessions from greenbug. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(2):128-136. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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

Обыкновенная злаковая тля *Schizaphis graminum* Rondani может значительно снизить урожай ячменя (*Hordeum vulgare* L.) в зерносеющих регионах на юге Российской Федерации. Возделывание генетически защищенных сортов считается наиболее радикальным и экономичным способом контроля численности этого вредителя. Дифференциальное взаимодействие с генотипами растения-хозяина, которое свойственно обыкновенной злаковой тле, нередко обусловливает утрату эффективности генов устойчивости, а широкое выращивание генетически однородных сортов приводит к драматичным потерям урожая зерна.

В литературе описано шесть аллелей четырех *Rsg*-генов устойчивости, которые проявляются против некоторых биотипов *S. graminum* в США. Локализованный в длинном плече хромосомы 3H доминантный аллель *Rsg1a* первоначально был выявлен у корейского сорта 'Omugi' и производных от него форм. Следует отметить коммерческий сорт 'Post', защищенный аллелем *Rsg1a* (Gardenhire, Chada, 1961; Smith et al., 1962; Gardenhire et al., 1973; Edwards et al., 1985; Azhaguvel et al., 2014). Образец местного ячменя из Пакистана PI 426756 несет доминантный аллель *Rsg2b* (Merkle et al., 1987). Этот ген, в отличие от *Rsg1a*, проявляется против биотипа TX1, вследствие чего генам были присвоены новые символы – *Rsg1* и *Rsg2* (Puterka et al., 1988; Anstead et al., 2003).

Последующие исследования позволили выявить множественный аллелизм у генов *Rsg1* и *Rsg2*. Образец *H. vulgare* subsp. *spontaneum* WBDC336 (PI 682028) из Туркменистана защищен аллелем *Rsg1.a3* (Armstrong et al., 2016; Xu et al., 2021), а пакистанский образец *H. vulgare* subsp. *spontaneum* WBDC053 (PI 681777) имеет аллель *Rsg2.a3*, тесно сцепленный либо аллельный *Rsg2* (Xu et al., 2022).

Локализованный в длинном плече хромосомы 3H ген *Rsg3*, идентифицированный у китайского образца PI 565676, контролирует высокую устойчивость к биотипу F обыкновенной злаковой тли и умеренно проявляющуюся – к биотипу E (Xu et al., 2023). Ген *Rsg4* идентифицирован у образца CI 2548 и также локализован в длинном плече хромосомы 3H. В отличие от *Rsg1* и *Rsg3*, *Rsg4* обусловливает устойчивость к широко распространенному в США биотипу тли TX1 (Xu et al., 2024).

Разнообразие эффективных генов устойчивости ячменя и других зерновых культур к обыкновенной злаковой тле для использования в селекции может быть существенно расширено за счет местных образцов, происходящих из стран Азии (Radchenko, Zubov, 2007; Radchenko et al., 2014; Radchenko et al., 2018), что обусловлено давностью отношений насекомого и растений-хозяев. Считают, что большинство групп тлей происходят из горных районов Индийской и Манчжурско-Китайской подобластей (Shaposhnikov, 1967).

Исследование в 2008 г. 180 афганских образцов позволило выделить 33 гетерогенные формы, которые содержат устойчивые к краснодарской популяции обыкновенной злаковой тли компоненты (Radchenko et al., 2014). Путем индивидуального отбора из семи образцов получены и размножены чистые линии.

Цель настоящей работы – исследование эффективности и генетического контроля устойчивости к тле у выделившихся в предыдущих опытах образцов ячменя. Кроме того, осуществили скрининг 65 образцов ячменя из Афганистана по устойчивости к «новой» популяции вредителя, собранной в 2023 г.

Материалы и методы

Материалом для исследований служили 65 образцов ячменя (главным образом местные формы и стародавние сорта), поступивших в коллекцию ВИР из Афганистана, 7 линий, выделенных из гетерогенных образцов в 2008 г., и восприимчивый к вредителю сорт 'Белогорский' (к-22089, Россия, Ленинградская область). Кроме того, изучали устойчивость сорта 'Post' (к-31204, США, защищен геном *Rsg1*), чистых линий, выделенных из гетерогенных образцов к-15600, к-15903, к-16190 (Китай), к-3885, к-3904, к-4080 (Монголия) и сорта 'Онохойский' (к-16626, Россия, Бурятия), каждая из которых имеет по одному гену устойчивости к тле, а также линии, выделенной из сорта 'Namji Milyang Native K647 1007' (к-28129, Северная Корея), защищенной доминантным и рецессивным аллелями (Radchenko et al., 2022, 2023a, b). Кроме того, оценили устойчивость к *S. graminum* гибридов F_1, F_2 и семей F_3 от скрещивания выделенной из образца к-22421 линии с сортом 'Белогорский'.

В лабораторных условиях (отдел генетики ВИР, г. Пушкин, Санкт-Петербург) оценивали поврежденность образцов ячменя краснодарской (Кубанская опытная станция – филиал ВИР, Гулькевичский район) популяцией *S. graminum*, собранной на сорго в 2023 г., и выделенными из нее клонами. Для получения клонов насекомого семена неустойчивого сорта раскладывали на влажную вату, помещенную в половинки чашек Петри, затем на появившиеся всходы в каждой чашке подсаживали одну партеногенетическую самку и накрывали стеклянными изоляторами, верхнюю часть которых затягивали мельничным газом. После начала отрождения личинок садки с полученными 93 клонами помещали на светоустановки.

Для скрининга образцов по устойчивости к тле в кювету с почвой высевали 10 рядов изучаемых форм и 2 ряда неустойчивого контроля. Появившиеся всходы заселяли популяцией *S. graminum* (смесь 93 клонов) путем стряхивания разновозрастных насекомых на растения. Питание тли приводит к некротизации растений, что позволяет при гибели контроля оценить степень поврежденности с помощью балловой шкалы от 0 (отсутствие симптомов повреждения) до 10. К устойчивому классу относили растения, поврежденность которых составляла 1–4 балла, степень повреждения 5–8 баллов означала умеренную устойчивость, а 9 и 10 баллов свидетельствовали о восприимчивости растений (Radchenko, 2008).

Оценили поврежденность линий с изученным нами ранее генетическим контролем устойчивости, линий, выделенных из афганских местных образцов, а также сорта 'Post' 93 клонами обыкновенной злаковой тли. Изучаемые образцы и неустойчивый контроль высевали в сосуды с почвой в круговом порядке и закрывали стеклянными изоляторами. Появившиеся всходы заселяли разновозрастными тлями одного клона, а при гибели контроля (9 и 10 баллов) оценивали поврежденность ячменя.

При анализе расщепления по устойчивости к тле семена гибридов F_2 и 80 семей F_3 от скрещивания выделенной из образца к-22421 линии 22421 с сортом 'Белогорский' высевали рядами в кювету с почвой. В эту же кювету помещали по одному ряду P_1, P_2 и F_1. Семена F_2 были собраны с одного растения F_1, а каждая семья F_3 являлась потомством одного растения F_2. Ювенильные растения заселяли смесью 93 клонов *S. graminum*. При гибели 'Бе-

логорского' оценивали поврежденность растений. К неустойчивому классу (S) относили растения, сходные по степени поврежденности с 'Белогорским' (9 и 10 баллов), устойчивыми (R) считали слабо поврежденные растения, сходные с линией 22421. С помощью критерия χ^2 оценивали соответствие фактически полученных и ожидаемых данных.

Результаты и обсуждение

Оценка 65 образцов ячменя из Афганистана позволила выделить 8 гетерогенных форм, которые содержали растения с высокой (2–4 балла) и умеренной (5–8 баллов) устойчивостью к обыкновенной злаковой тле (табл. 1). Преобладали образцы с широким спектром степени поврежденности растений. Высокая изменчивость признака может объясняться присутствием в популяции *S. graminum* клонов, различающихся по вирулентности к образцам ячменя, а также проявлением слабо экспрессирующихся генов устойчивости.

Результаты оценки степени поврежденности ячменя популяциями *S. graminum*, собранными в 2008 и 2023 г., в большинстве случаев не совпадают (см. табл. 1). Очевидно, в изученных выборках семян частота одного из фенотипических классов (устойчивый, умеренно устойчивый, восприимчивый) была низка либо он вовсе отсутствовал. Утрата устойчивости может объясняться и накоплением в популяции вредителя вирулентных к устойчивым ранее образцам клонов.

Оценка устойчивости семи чистых линий, выделенных из афганских коллекционных образцов, и сорта 'Post' ко всем имевшимся в нашем распоряжении 93 клонам *S. graminum* позволила выявить 29 фенотипов вирулентности (биотипов) тли. Доминировал (12,9%) фенотип, авирулентный к линиям 20209, 20750, 22421 и сильно повреждающий остальные образцы (табл. 2); 12 фенотипов встречались с низкой частотой (1,1%).

В этих экспериментах к устойчивому классу (R) мы относили только случаи отчетливого проявления генов устойчивости (поврежденность растений 1–4 балла). Од-

Таблица 1. Образцы ячменя из Афганистана, выделившиеся по устойчивости к *Schizaphis graminum* Rondani
Table 1. Afghan barley accessions identified for their resistance to *Schizaphis graminum* Rondani

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Образец / Accession	Разновидность / Variety	Поврежденность, балл / Damage score	
			2008 г.	2024 г.
5930	Местный	*nutans*	8, 10	4, 5, 7, 8, 9, 10
5931	Местный богарный	*pallidum*	8, 9, 10	4, 7, 8, 9, 10
5932	Местный	*pallidum*	2, 7, 8, 10	8, 9, 10
5938	Местный	*nutans*	3, 7, 8, 9, 10	10
5942	Местный терсмал	*pallidum*	2	10
5943	Местный поливной	*pallidum*	8, 9, 10	3, 4, 5, 8
5948	Местный	*pallidum*	2, 3, 4, 9, 10	2, 3, 4, 7
5965	Местный	*pallidum*	Не оценивался	2, 4, 5, 8, 9, 10
5983	Местный	*coeleste*	10	2, 3, 8, 9, 10
6014	Местный ляльми, неполивной	*pallidum*	3, 9, 10	Не оценивался
6015	Местный гекдаби ширик	*pallidum*	3, 8, 10	Не оценивался
6017	Местный аби	*pallidum, nutans*	3, 7, 10	Не оценивался
6022	Местный	*coeleste, pallidum, subrikotense*	3, 7, 10	Не оценивался
6025	Местный	*pallidum*	3, 8, 10	8, 9, 10
6026	Местный	*pallidum, rikotense*	3, 7, 8, 9	3, 4, 8, 9, 10
6028	Местный	*pallidum*	3, 7, 9, 10	10
6040	Местный кальджоу	*pallidum*	3, 7, 8, 10	10
6044	Местный	*rikotense, pallidum*	3, 7, 8, 10	Не оценивался
6063	Местный	*pallidum*	3, 7, 10	Не оценивался
6065	Местный	*pallidum*	1, 7, 10	Не оценивался
9208	Местный	*rikotense*	1, 3, 10	Не оценивался
20209	Местный	*pallidum, pyramidatum*	2, 3, 4, 9, 10	Не оценивался

Таблица 1. Окончание
Table 1. The end

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Образец / Accession	Разновидность / Variety	Поврежденность, балл / Damage score	
			2008 г.	2024 г.
20670	Местный	*pallidum*, ед. *nutans*, ед. *parallelum*	2, 3, 10	Не оценивался
20673	Местный	*pallidum*	3, 5, 10	Не оценивался
20680	Местный	*pallidum*	1, 3, 7, 10	Не оценивался
20686	Местный	*pallidum*	3, 9, 10	Не оценивался
20688	Местный	*pallidum*	3, 5, 10	Не оценивался
20692	Местный	*pallidum, parallelum*	3, 5, 7, 10	Не оценивался
20693	Местный	*pallidum, parallelum*, ед. *nutans, rikotense*	2, 10	Не оценивался
20696	Местный	*pallidum, pyramidatum*	3, 5, 10	Не оценивался
20745	Местный	*pallidum, pyramidatum*	3, 10	Не оценивался
20746	Местный	*coeleste*, ед. *pallidum*, ед. *himalayense*	2, 10	Не оценивался
20750	Местный	*pallidum*	2, 5	Не оценивался
20753	Местный	*rikotense*	2, 3, 7, 8, 9	Не оценивался
21482	Местный N 544	*pallidum*	3, 10	Не оценивался
22421	Местный	*pallidum*	1, 3, 8, 9, 10	Не оценивался
22426	Местный	*pallidum*	3, 8, 10	9, 10
26651	Местный	*pallidum*	4, 10	Не оценивался
27214	'Istaru'	*pallidum*	Не оценивался	4, 5, 8, 9, 10
'Белогорский' (восприимчивый контроль)			9, 10	9, 10

нако при заселении линий клонами *S. graminum* наблюдали также умеренную устойчивость растений (6–8 баллов), которая контролируется генами со слабым фенотипическим проявлением. Эти случаи, как и явно выраженную восприимчивость растений (поврежденность 9 и 10 баллов, то есть вирулентность *S. graminum* и к главным, и к слабо проявляющимся генам устойчивости), относили к восприимчивому классу (S). Очевидно, мы наблюдали дифференциальное взаимодействие с генотипами обыкновенной злаковой тли не только отчетливо проявляющихся (главных), но и слабоэкспрессирующихся (малых) генов, которые, вопреки широко распространенному мнению, не могут быть основой длительно сохраняющейся устойчивости растений. К аналогичному выводу мы пришли и в результате исследования устойчивости коллекции ячменя из стран Восточной Азии (Radchenko et al., 2023a).

Различающиеся по фенотипам вирулентности «тест-клоны» *S. graminum* позволяют идентифицировать у образцов ячменя гены резистентности к насекомому. Сильное повреждение изучаемого образца клоном тли, авирулентным к тестеру данного гена устойчивости, указывает на отсутствие функционального аллеля этого гена у образца ячменя. Линии 20209, 20750 и 22421 устойчивы к тле с фенотипом вирулентности 1, тогда как 'Post' и остальные четыре линии – восприимчивы (см. табл. 2). Отсюда следует, что аллели устойчивости у данных линий отличны от аллелей, которыми защищены остальные образцы ячменя. Взаимодействие ячменя и *S. graminum* с фенотипом вирулентности 2 указывает на отличие генетического контроля устойчивости линий 20209 и 20750 от 22421, а заселение образцов тлей с фенотипом 3 привело к выводу о различии контроля изучаемого признака у линий 20209 и 20750. Последующее сравнение взаимодействия образцов ячменя с клонами тли указывает, что все семь линий имеют разные аллели устойчивости к *S. graminum*, которые отличаются также от идентифицированного ранее гена *Rsg1*.

Опыты с клонами обыкновенной злаковой тли показали, что существенное варьирование степени повреждения растений обусловлено главным образом наличием в изученной популяции клонов, которые различаются по вирулентности к анализируемым образцам ячменя. Все выделенные из афганских образцов линии защищены различными аллелями устойчивости, которые отличаются и от идентифицированного ранее *Rsg1* (сорт 'Post'), однако их эффективность в большинстве случаев низка (табл. 3). Частота клонов, вирулентных к четырем линиям, варьирует от 75,3% до 95,7%; 37,6% и 49,4% клонов сильно повреждают линии 20750 и 22421. Ис-

Таблица 2. **Фенотипическое разнообразие краснодарской популяции обыкновенной злаковой тли**
Table 2. **Phenotypic diversity of the Krasnodar greenbug population**

Фенотип вирулентности / Virulence phenotype	Число фенотипов / Number of phenotypes	Устойчивость образцов ячменя к клонам *Schizaphis graminum* с разными фенотипами вирулентности / Resistance of barley accessions to greenbug clones with different virulence phenotypes							
		'Post'	9208	20209	20670	20673	20750	22421	22426
1	12	S	S	**R**	S	S	**R**	**R**	S
2	9	S	S	**R**	S	S	**R**	S	S
3	9	S	S	**R**	S	S	S	S	S
4	8	S	S	**R**	S	**R**	**R**	S	S
5	6	S	S	**R**	S	S	S	**R**	S
6	6	**R**	S	**R**	S	S	S	S	S
7	4	S	**R**	**R**	S	S	**R**	**R**	S
8	4	S	S	**R**	S	**R**	**R**	**R**	S
9	4	**R**	S	**R**	S	S	**R**	**R**	S
10	3	**R**	S	**R**	S	S	**R**	S	S
11	3	S	**R**	**R**	**R**	S	S	**R**	S
12	3	**R**	S	**R**	S	S	S	**R**	S
13	2	S	**R**	**R**	S	**R**	**R**	**R**	S
14	2	S	S	**R**	S	**R**	S	S	S
15	2	**R**	S	**R**	S	**R**	**R**	**R**	S
16	2	**R**	S	**R**	S	**R**	**R**	S	S
17	2	S	S	S	S	S	S	S	S
18	1	**R**	**R**	**R**	**R**	S	**R**	**R**	**R**
19	1	**R**	**R**	**R**	S	S	**R**	S	S
20	1	**R**	**R**	**R**	S	**R**	**R**	S	S
21	1	**R**	S	**R**	**R**	S	**R**	**R**	S
22	1	**R**	S	S	S	S	S	**R**	S
23	1	S	**R**	**R**	**R**	**R**	**R**	S	S
24	1	S	**R**	**R**	S	S	**R**	S	S
25	1	S	**R**	**R**	S	S	S	**R**	**R**
26	1	S	**R**	**R**	S	S	S	S	**R**
27	1	S	S	**R**	**R**	S	**R**	**R**	S
28	1	S	S	**R**	S	S	**R**	**R**	**R**
29	1	S	S	**R**	**R**	**R**	S	**R**	S

Примечание: здесь и далее R – устойчивость, S – восприимчивость образца
Note: here and hereinafter, R means resistance, and S means susceptibility of accessions

ключение составляет линия 20209 (3,2% вирулентных клонов). Нам удалось выявить и слабо проявляющуюся устойчивость растений к отдельным клонам *S. graminum*. Устойчивыми к популяции тли оказались две линии – 20209 и 22421 (см. табл. 3).

Все семь линий из Афганистана защищены аллелями устойчивости, отличающимися от идентифицированных ранее, на что указывает сравнение поврежденности экспериментальных образцов тест-клонами насекомого (см. табл. 3). Достаточно высокий уровень устойчивости к по-

Таблица 3. **Устойчивость линий ячменя к популяции и тест-клонам *Schizaphis graminum* Rondani**
Table 3. **Resistance of barley lines to the population and test clones of *Schizaphis graminum* Rondani**

Сорт, линия / Cultivar, line	Происхождение / Origin	Устойчивость к популяции, балл / Resistance to the population, score	Частота вирулентных клонов, % / Frequency of virulent clones, %	Клон *Schizaphis graminum* / Clone of *Schizaphis graminum*							
				1	2	3	4	5	6	7	8
Линии, выделенные из афганских образцов											
20209	Афганистан	3, 4, 5	3,2	R	R	R	S	R	R	R	R
22421	Афганистан	2, 3, 4	49,4	S	R	S	S	S	S	S	R
20750	Афганистан	3, 4, 7, 8, 10	37,6	S	S	R	S	R	R	S	R
9208	Афганистан	7, 9, 10	82,8	S	S	S	S	S	R	S	S
20670	Афганистан	8, 9, 10	91,4	S	S	S	S	S	S	S	S
20673	Афганистан	3, 4, 8, 9, 10	75,3	S	S	R	S	S	S	R	S
22426	Афганистан	9, 10	95,7	S	S	S	S	S	S	S	R
Линии с изученным генетическим контролем устойчивости											
16626	Россия	1, 2, 3, 4	3,2	R	R	R	R	R	R	R	R
3885	Монголия	6, 7, 8, 9	89,2	S	S	S	S	S	S	R	R
3904	Монголия	10	95,7	S	S	R	S	S	R	R	S
4080	Монголия	9, 10	96,8	S	S	R	S	S	S	S	S
15903	Китай	2, 3, 7, 8	16,1	R	S	R	R	R	R	R	S
15600	Китай	8, 9, 10	57,0	R	S	R	S	R	S	R	S
16190	Китай	9, 10	77,4	R	S	S	S	S	S	S	S
28129	Северная Корея	7, 9, 10	57,0	S	R	R	S	R	S	R	S
‘Post’ (ген *Rsg1*)	США	10	73,1	R	S	S	S	R	S	S	S
‘Белогорский’ (контроль)	Россия	10	100	S	S	S	S	S	S	S	S

пуляции *S. graminum* в 2023 г. сохранили две линии, имеющие по одному доминантному гену устойчивости: 16626 (Россия) и 15903 из Китая.

Следует отметить разительные изменения структуры краснодарской популяции обыкновенной злаковой тли. В 2021 г. было найдено 32–45% клонов, вирулентных к сорту ‘Post’ и линиям, выделенным из монгольских образцов (Radchenko et al., 2022), в 2023 г. – 73,1–96,8% (см. табл. 3). Ранее, в 2013 г., частота вирулентных к ‘Post’ клонов составляла 26–36%, к линии 16190 – 18%, 28129 – 30–34% и к линии 15600 – 44–50% (Radchenko et al., 2019); в 2023 г. эти частоты варьировали от 57,0% до 77,4% (см. табл. 3).

Значительный полиморфизм обитающих на Северном Кавказе популяций вредителя по вирулентности к образцам сорго, ячменя и овса отмечался нами и ранее. Например, в 2022 г. оценка поврежденности 11 линий ячменя 108 клонами обыкновенной злаковой тли позволила выявить 52 фенотипа вирулентности *S. graminum* (Radchenko et al., 2023a). В зерносеющих регионах страны на обширных площадях выращиваются неустойчивые к вредителю сорта ячменя. Так, среди 248 допущенных к использованию в России сортов только 11 содержали растения с отчетливо проявляющейся устойчивостью к насекомому (Abdullaev et al., 2020). Очевидно, повсеместное возделывание восприимчивых сортов не способствует формированию и отбору фенотипов насекомого, обладающих специфической вирулентностью. Мы полагаем, что в Краснодарском крае фенотипы вирулентности (биотипы) *S. graminum* формируются только при питании вредителя на диких злаках. В литературе и ранее указывалось на важную роль диких растений в эволюции вирулентности насекомого (Anstead et al., 2003).

Анализировали расщепление F_2 от скрещивания линии 22421 с неустойчивым сортом ‘Белогорский’ при заселении растений краснодарской популяцией фитофага. В момент учета расщепления повреждение устойчивых образцов и гибридов F_1 соответствовало 1–3 баллам, то есть устойчивость доминировала. В комбинации скрещивания сорта ‘Белогорский’ с линией 22421 соотношение устойчивых (R) и восприимчивых (S) фенотипов удовлетворяло предположению о доминантном моногенном контроле анализируемого признака, однако не исключено и присутствие еще одного гена, у которого функциональным является рецессивный аллель (табл. 4).

Чтобы остановиться на одном из двух предположений, мы проанализировали семьи F_3 комбинации скрещивания ‘Белогорский’ × линия 22421. Соотношение устой-

Таблица 4. Расщепление по устойчивости к *Schizaphis graminum* Rondani гибридов F_2 от скрещивания линии 22421 с восприимчивым тестером

Table 4. Segregation for greenbug resistance in F_2 hybrids from crossing 22421 with a susceptible tester

Комбинация скрещивания / Cross combination	Оценено растений / Total number of plants	Соотношение фенотипов R : S / Phenotype ratio R : S		χ^2	*P*
		фактическое / observed	теоретическое / expected		
'Белогорский' × линия 22421	157	121 : 36	3 : 1	0,359	0,50–0,75
			13 : 3	1,801	0,10–0,20
Линия 22421 × 'Белогорский'	312	248 : 64	3 : 1	3,350	0,05–0,10

Примечание: $\chi^2_{0,05} = 3,84$

Note: $\chi^2_{0.05} = 3.84$

чивых, расщепляющихся и восприимчивых семей 19R : 41RS : 20S соответствовало ожидаемому 20R : 40RS : 20S ($\chi^2 = 0,075$; P = 0,95–0,99) при моногенном доминантном контроле устойчивости к обыкновенной злаковой тле, то есть гипотеза о дигенном контроле признака отвергается.

Заключение

Разнообразие коллекции ячменя из Афганистана по генам устойчивости к *S. graminum* достаточно высоко. Вместе с тем очень высок и полиморфизм краснодарской популяции обыкновенной злаковой тли по вирулентности к изученным образцам ячменя. Различающиеся по степени поврежденности растений линии ячменя защищены генами устойчивости, эффективными против меньшей (линии 9208, 20670 и другие) или большей (линия 20209) части краснодарской популяции вредителя.

Выделенные из афганских образцов ячменя линии имеют различные аллели устойчивости, которые отличаются от *Rsg1*, а также от выявленных нами ранее аллелей, которыми защищены линии 3885, 3904, 4080 (Монголия), 15600, 15903, 16190 (Китай), 28129 (Северная Корея) и 16626 (РФ, Бурятия), однако их эффективность в большинстве случаев низка. Устойчивыми к популяции тли оказались две линии – 20209 и 22421. С помощью гибридологического анализа показано, что линия 22421 защищена одним доминантным геном устойчивости к *S. graminum*.

References / Литература

Abdullaev R.A., Batasheva B.A., Alpatieva N.V., Chumakov M.A., Radchenko E.E., Kovaleva O.N. et al. Resistance of barley cultivars approved for use in Russia to harmful organisms and toxic aluminum ions. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2020;181(3):120-127. [in Russian] (Абдуллаев Р.А., Баташева Б.А., Алпатьева Н.В., Чумаков М.А., Радченко Е.Е., Ковалева О.Н. и др. Устойчивость допущенных к использованию в России сортов ячменя к вредным организмам и токсичным ионам алюминия. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2020;181(3):120-127). DOI: 10.30901/2227-8834-2020-3-120-127

Anstead J.A., Burd J.D., Shufran K.A. Over-summering and biotypic diversity of *Schizaphis graminum* (Homoptera: Aphididae) populations on noncultivated grass hosts. *Environmental Entomology*. 2003;32(3):662-667. DOI: 10.1603/0046-225X-32.3.662

Armstrong J.S., Mornhinweg D.W., Payton M.E., Puterka G.J. The discovery of resistant sources of spring barley, *Hordeum vulgare* ssp. *spontaneum*, and unique greenbug biotypes. *Journal of Economic Entomology*. 2016;109(1):434-438. DOI: 10.1093/jee/tov320

Azhaguvel P., Mornhinweg D., Vidya-Saraswathi D., Rudd J.C., Chekhovskiy K., Saha M. et al. Molecular mapping of greenbug (*Schizaphis graminum*) resistance gene *Rsg1* in barley. *Plant Breeding*. 2014;133(2):227-233. DOI: 10.1111/pbr.12143

Edwards L.H., Smith E.L., Pass H., Morgan G.H. Registration of Post barley. *Crop Science*. 1985;25(2):363.

Gardenhire J.H., Chada H.L. Inheritance of greenbug resistance in barley. *Crop Science*. 1961;1(5):349-352. DOI: 10.2135/cropsci1961.0011183X000100050016x

Gardenhire J.H., Tuleen N.A., Stewart K.W. Trisomic analysis of greenbug resistance in barley, *Hordeum vulgare* L. *Crop Science*. 1973;13(6):684-685. DOI: 10.2135/cropsci1973.0011183X001300060029x

Merkle O.G., Webster J.A., Morgan G.H. Inheritance of a second source of greenbug resistance in barley. *Crop Science*. 1987;27(2):241-243. DOI: 10.2135/cropsci1987.0011183X002700020023x

Puterka G.J., Peters D.C., Kerns D.L., Slosser J.E., Bush L., Worrall D.W. et al. Designation of two new greenbug (Homoptera: Aphididae) biotypes G and H. *Journal of Economic Entomology*. 1988;81(6):1754-1759. DOI: 10.1093/jee/81.6.1754

Radchenko E.E. Cereal aphids (Zlakovye tli). In: *The study of the genetic resources of cereal crops for resistance to harmful organisms. Guidelines (Izucheniye geneticheskikh resursov zernovykh kultur po ustoychivosti k vrednym organizmam. Metodicheskoye posobiye)*. Moscow: Russian Academy of Agricultural Sciences; 2008. p.214-257. [in Russian] (Радченко Е.Е. Злаковые тли. В кн.: *Изучение генетических ресурсов зерновых культур по устойчивости к вредным организмам. Методическое пособие*. Москва: Россельхозакадемия; 2008. С.214-257).

Radchenko E.E., Abdullaev R.A., Akimova D.E., Anisimova I.N. Genetic diversity of barley accessions from East Asia for greenbug resistance. *Plants (Basel)*. 2023a;12(22):3797. DOI: 10.3390/ plants12223797

Radchenko E.E., Abdullaev R.A., Akimova D.E., Zajtseva I.Y. 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., Акимо-

ва 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

Radchenko E.E., Abdullaev R.A., Dyatlova K.D., Akimova D.E., Zveinek I.A. Diversity of barley accessions from the Asian part of Russia in greenbug resistance. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023b;184(4):215-221. [in Russian] (Радченко Е.Е., Абдуллаев Р.А., Дятлова К.Д., Акимова Д.Е., Звейнек И.А. Разнообразие образцов ячменя из азиатской части Российской Федерации по устойчивости к обыкновенной злаковой тле. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023b;184(4):215-221). DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-215-221

Radchenko E.E., Alpatieva N.V., Chumakov M.A., Abdullaev R.A. Variability of the North Caucasian populations of the greenbug for host virulence and discovered by molecular markers. *Russian Journal of Genetics*. 2019;55(11):1417-1425. DOI: 10.1134/S1022795419110127

Radchenko E.E., Kuznetsova T.L., Chumakov M.A., Loskutov I.G. Greenbug (*Schizaphis graminum*) resistance in oat (*Avena* spp.) landraces from Asia. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2018;65(2):571-576. DOI: 10.1007/s10722-017-0554-9

Radchenko E.E., Kuznetsova T.L., Zveinek I.A., Kovaleva O.N. Greenbug resistance in barley accessions from East and South Asia. *Russian Agricultural Sciences*. 2014;40(2):117-120. DOI: 10.3103/S1068367414020177

Radchenko E.E., Odintsova I.G., Vlasova T.V. Inheritance of a weakly expressed greenbug resistance in sorghum. *Russian Journal of Genetics*. 2001;37(10):1144-1149. DOI: 10.1023/A:1012352521382

Radchenko E.E., Zubov A.A. Genetic diversity of sorghum in greenbug resistance. *Russian Agricultural Sciences*. 2007;33(4):223-225. DOI: 10.3103/S1068367407040039

Shaposhnikov G.Kh. Aphid evolution in connection with specialization and changes of hosts (Evolyutsiya tley v svyazi so spetsializatsiyey i smenoy khozyayev) [dissertation]. Leningrad: Zoological Institute of the USSR Academy of Sciences; 1967. [in Russian] (Шапошников Г.Х. Эволюция тлей в связи со специализацией и сменой хозяев: дис. ... докт. биол. наук. Ленинград: Зоологический институт АН СССР; 1967).

Smith O.D., Schlehuber A.M., Curtis B.C. Inheritance studies of greenbug (*Toxoptera graminum* Rond.) resistance in four varieties of winter barley. *Crop Science*. 1962;2(6):489-491.

Xu X., Mornhinweg D., Bai G., Li G., Bian R., Bernardo A. Characterization of a new barley greenbug resistance gene *Rsg4* in the Chinese landrace CI 2458. *The Plant Genome*. 2024;17(4):e20527. DOI: 10.1002/tpg2.20527

Xu X., Mornhinweg D., Bai G., Li G., Bian R., Bernardo A. et al. Characterization of *Rsg3*, a novel greenbug resistance gene from the Chinese barley landrace PI565676. *The Plant Genome*. 2023;16(1):e20287. DOI: 10.1002/tpg2.20287

Xu X., Mornhinweg D., Bernardo A., Li G., Bian R., Steffenson B.J. et al. Characterization of *Rsg2.a3*: A new greenbug resistance allele at the *Rsg2* locus from wild barley (*Hordeum vulgare* ssp. *spontaneum*). *The Crop Journal*. 2022;10(6):1727-1732. DOI: 10.1016/j.cj.2022.01.010

Xu X., Mornhinweg D.W., Bai G., Steffenson B., Bian R., Li G. et al. *Rsg1.a3*: A new allele conferring unique resistance to greenbug Biotype H at the *Rsg1* locus in *Hordeum* vulgare ssp. *spontaneum*. *Crop Science*. 2021;61(5):3578-3585. DOI: 10.1002/csc2.20581

Информация об авторах

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

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

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

Information about the authors

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

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

Renat A. Abdullaev, Cand. Sci. (Biology), Leading 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

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 12.03.2026; одобрена после рецензирования 20.04.2026; принята к публикации 04.05.2026.
The article was submitted on 12.03.2026; approved after reviewing on 20.04.2026; accepted for publication on 04.05.2026.

ГЕНЕТИКА КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 633.13;631.527.5
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o21

CC BY

Наследование основных хозяйственно ценных признаков гибридами F_1 овса в условиях Северного Зауралья

А. К. Таутекенова[1], Н. А. Боме[2]

[1] Федеральный исследовательский центр Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северного Зауралья, Тюменская область, Россия

[2] Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

Автор, ответственный за переписку: Азия Кайсаровна Таутекенова, atautekenova@gmail.com

Актуальность. В условиях нестабильного климата Северного Зауралья создание адаптивных и высокопродуктивных сортов овса посевного (*Avena sativa* L.) требует вовлечения в селекцию новых доноров ценных генов и глубокого изучения закономерностей наследования хозяйственно ценных признаков. Цель исследования – определить эффект гетерозиса и тип фенотипического доминирования основных количественных признаков у гибридов первого поколения (F_1) овса посевного в почвенно-климатических условиях Северного Зауралья.
Материалы и методы. В 2023–2024 гг. в лесостепной зоне Тюменской области изучено 14 гибридных комбинаций (F_1), полученных от скрещивания местных сортов (‘Тоболяк’, ‘Отрада’, ‘Фома’) с донорами генов устойчивости к корончатой ржавчине (*Pc*). Оценка проведена на опытном поле НИИСХ Северного Зауралья и в лаборатории геномных исследований в растениеводстве согласно методическим указаниям ВИР; рассчитаны коэффициенты фенотипического доминирования (*Hp*) и показатели истинного гетерозиса.
Результаты. Установлено, что экстремальные температуры в период гибридизации (2023 г.) до +36°С лимитировали завязываемость зерен. В 2024 г. у всех изученных гибридов выявлен эффект гетерозиса одновременно по четырем признакам: высоте растения, длине метелки, числу и массе зерен с растения. Позитивное сверхдоминирование по всем хозяйственно ценным признакам отмечено в комбинациях ‘Тоболяк’ × ‘AC Francis’, ‘AC Francis’ × ‘Фома’, Нарпс × ‘Отрада’; отрицательное сверхдоминирование – в комбинациях к-15021 × ‘Тоболяк’, ‘Отрада’ × к-15021.
Заключение. По комплексу признаков и максимальному проявлению гибридной силы выделены перспективные комбинации: ‘Тоболяк × ‘AC Francis’, ‘AC Francis’ × ‘Фома’, ‘Фома’ × к-15021 и Нарпс × ‘Отрада’. Данные генотипы рекомендуются для дальнейшей селекционной работы как источники высокой продуктивности и адаптивности.

Ключевые слова: гетерозис, овес, гибриды, коэффициент фенотипического доминирования, гибридизация

Благодарности: работа выполнена за счет государственного задания 124022900011-6 и при поддержке Западно-Сибирского межрегионального научно-образовательного центра мирового уровня.

Для цитирования: Таутекенова А.К., Боме Н.А. Наследование основных хозяйственно ценных признаков гибридами F_1 овса в условиях Северного Зауралья. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(2):137-147. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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.

© Таутекенова А.К., Боме Н.А., 2026

GENETICS OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o21

Inheritance of basic agronomic traits by F_1 hybrids of oat (*Avena sativa* L.) under the conditions of the Northern Trans-Urals

Aziya K. Tautekenova[1], Nina A. Bome[2]

[1] *Tyumen Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Research Institute of Agriculture for the Northern Trans-Ural Region, Tyumen Province, Russia*

[2] *University of Tyumen, Tyumen, Russia*

Corresponding author: Aziya K. Tautekenova, atautekenova@gmail.com

Background. Development of adaptable high-yielding cultivars of common oat (*Avena sativa* L.) for the unstable climate of the Northern Trans-Urals requires the involvement of new donors of valuable genes in breeding practice and an in-depth study into the inheritance patterns of useful agronomic traits. The objective was to determine the effect of heterosis and the type of phenotypic dominance for the main quantitative characters in first-generation (F_1) hybrids of common oat under the soil and climate conditions of the Northern Trans-Urals.
Materials and methods. In 2023–2024, fourteen hybrid combinations (F_1) from crosses between local cultivars ('Tobolyak', 'Otrada', and 'Foma') and donors of crown rust resistance genes (*Pc*) were studied in the forest-steppe zone of Tyumen Province. The tests were carried out in the experimental field of the Research Institute of Agriculture for the Northern Trans-Ural Region and the laboratory of genomics research in crop production using VIR's guidelines. Phenotypic dominance coefficients (*Hp*) and true heterosis values were calculated.
Results. It was found that extreme temperatures up to +36°C during the hybridization period (2023) limited grain setting. In 2024, all the studied hybrids manifested the effect of heterosis simultaneously in four plant characters: plant height, panicle length, grain number per plant, and grain weight per plant. Positive overdominance for all useful agronomic traits was observed in the combinations 'Tobolyak' × 'AC Francis', 'AC Francis' × 'Foma', and Narps × 'Otrada'; negative overdominance was shown by k-15021 × 'Tobolyak', and 'Otrada' × k-15021.
Conclusions. Promising combinations were identified for a set of traits and the highest hybrid vigor: 'Tobolyak' × 'AC Francis', 'AC Francis' × 'Foma', 'Foma' × k-15021, and Narps × 'Otrada'. These genotypes are recommended for further breeding work as sources of high productivity and adaptability.

Keywords: heterosis, oat, hybrids, phenotypic dominance coefficient, hybridization

Acknowledgments: the work was funded through State Task 124022900011-6 and supported by the West Siberian Interregional Scientific and Educational World-Class Center.

For citation: Tautekenova A.K., Bome N.A. Inheritance of basic agronomic traits by F_1 hybrids of oat (*Avena sativa* L.) under the conditions of the Northern Trans-Urals. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(2):137-147. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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

В современной селекции сельскохозяйственных культур гибридизация остается фундаментальным методом создания генотипов, адаптированных к изменениям климата и абиотическим и биотическим стрессам. В гибридном организме признаки и свойства, унаследованные от родительских форм, образуют различные комбинации, характер проявления которых специфичен для каждого поколения и существенно зависит от факторов окружающей среды (Krotova, Batalova, 2020). Гетерозис представляет собой свойство гибридов первого поколения превосходить родительские формы по степени развития одного или нескольких признаков. Для овса (*Avena sativa* L.), как и для других зерновых культур, гетерозис имеет практическое значение, он может увеличивать урожайность, улучшать устойчивость к болезням и стрессам, повышать качество зерна.

Одним из вредоносных заболеваний овса считается корончатая ржавчина (*Puccinia coronate* Corda f. sp. *avenae* Erikss.), и создание исходного материала крайне важно для повышения продуктивности и стабильности овса. В генетико-селекционных исследованиях выделяют истинный гетерозис (превышение по признакам над лучшей родительской формой) и гипотетический гетерозис (превышение над средним показателем обоих родителей) (Kilchevsky et al., 2008; Bogomolov, Vostrikova, 2022).

Подбор родительских пар для скрещивания представляет собой непростую задачу, так как потомству не передаются признаки или свойства родительских организмов в первоначальном виде. Наследуются гены, а проявление признаков зависит от их экспрессии в конкретных условиях окружающей среды. В связи с этим особое значение приобретает определение коэффициента фенотипического доминирования. Данный коэффициент широко используется в селекции овса для идентификации генетических взаимодействий и оценки селекционного материала на ранних этапах.

Он характеризует степень выраженности доминантных эффектов по отношению к полному доминированию либо аддитивному действию генов в формировании фенотипа гибридов. Основной отличительной особенностью гибридов F_1 является проявление эффекта гетерозиса по отдельным количественным и качественным признакам, что обусловлено переходом генов в гетерозисное состояние и благоприятным сочетанием доминантных аллелей (Litun et al., 2001). При скрещивании самый высокий эффект гетерозиса отмечают у экологически и географически отдаленных родительских форм: чем больше генетические различия у родителей, тем выше вероятность гетерозиса у гибридов (Lukomets et al., 2010).

Предварительный отбор и выбраковка малопродуктивных комбинаций в ранних гибридных поколениях на основе оценки гетерозиса позволяют с высокой долей вероятности прогнозировать появление ценных трансгрессивных форм в последующих популяциях (Duktova, Kuznetsova, 2018). Это существенно оптимизирует селекционный процесс, сокращая объемы трудоемких полевых работ.

Цель исследования – определить эффект гетерозиса и тип фенотипического доминирования основных количественных признаков у гибридов первого поколения (F_1) овса посевного в почвенно-климатических условиях Северного Зауралья.

Материалы и методы

Полевые исследования проводились на опытном поле в лесостепной зоне Северного Зауралья (Тюменский район, пос. Московский, координаты: 57°05’20.4”N, 65°23’49.9”E); анализ растений и обработка экспериментальных данных осуществлялись в лаборатории геномных исследований в растениеводстве Научно-исследовательского института сельского хозяйства Северного Зауралья – филиале Тюменского научного центра СО РАН в 2023–2024 гг. Материалом для изучения параметров гетерозиса послужили 14 простых гибридных комбинаций овса посевного, созданных на основе целенаправленных скрещиваний. В качестве родительских форм использованы (табл. 1): сорта тюменской селекции: ‘Тоболяк’ (к-15827), ‘Отрада’ (к-15380) и ‘Фома’ (к-15451); сорта – доноры генов устойчивости к корончатой ржавчине *Pc*, характеризующиеся различным эколого-географическим происхождением: ‘AC Medalion’ (к-14914, Канада), ‘AC Francis’ (к-15302, Канада), ‘PC 68’ (к-14398, Канада), а также донор Нарпс с геном устойчивости к корончатой ржавчине *Pc39* (к-15319) и линия к-15021 с геном устойчивости *Pc39*, которые были предоставлены из коллекции Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР).

Погодные условия в годы проведения исследований (табл. 2) характеризовались значительной вариабельностью и отклонениями от среднемноголетних значений. Температура воздуха в день проведения кастрации (04.07.23) варьировала в пределах 25–32°С, а в период опыления (07.07.2023–08.07.2023) – 25–28°С при полном отсутствии осадков. Пыльца овса очень чувствительна, в жаркую погоду при дефиците влаги она теряет свою жизнеспособность. В период завязываемости зерен условия были экстремальными, так как температура воздуха достигала 31–36°С. Последующее обильное выпадение осадков (40 мм, что выше нормы) на фоне понижения температуры до 17°С также оказало лимитирующее влияние на завязываемость гибридных зерен. В период формирования гибридных зерен температурный режим превышал среднемноголетние значения на 2–5°С. Выпадение осадков было неравномерным, зафиксировано их отсутствие в I – II декадах августа и незначительное количество – в III декаде августа – III декаде сентября (на 2–13 мм меньше среднемноголетних значений). Засуха в период формирования и налива зерна, как отмечают исследователи, способствует формированию мелкого зерна с повышенной пленчатостью и остистостью (Mansapova et al., 2020).

Оценка гибридов первого поколения (F_1) проведена в 2024 г. В начале вегетационного периода в 2024 г. температура воздуха находилась на уровне среднемноголетних значений. Осадки во второй декаде мая (69 мм) превышали среднемноголетние значения (14 мм) и обеспечили достаточный запас почвенной влаги, что благоприятно отразились на полевой всхожести семян и начальном росте растений овса. Летний период отличался умеренным температурным фоном и неравномерным распределением осадков. Наиболее критические условия сложились в I декаде июля (9 мм при норме 28 мм) и I декаде августа (12 мм при норме 20 мм). Овес – влаголюбивая культура, поэтому дефицит влаги крайне опасен в период «выход в трубку – выметывание» (Tautekenova et al., 2022). Во второй декаде августа выпало 42 мм, что в 2 раза больше среднемноголетних значений. В целом вегетационный период 2024 г. был умеренно теплым

Таблица 1. **Характеристика образцов овса посевного, использованных в скрещиваниях**
Table 1. **Characteristics of common oat accessions used in crosses**

Сорт или линия / Cultivar or line	Номер по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Происхождение / Origin	Группа спелости / Maturity group	Наличие гена устойчивости к *Puccinia coronate* Corda f. sp. *avenae* Erikss. / Presence of *Puccinia coronate* Corda f. sp. *avenae* Erikss. resistance genes
'Тоболяк'	15827	Россия (Тюменская область)	среднеспелые	–
'Отрада'	15380	Россия (Тюменская область)	среднеспелые	–
'Фома'	15451	Россия (Тюменская область)	ранние	–
'РС 68'	14398	Канада	ранние	*Pc 68*
'AC Medalion'	14914	Канада	ранние	*Pc38*, *Pc39*, *Pc68*, *Pg2*, *Pg9*, *Pg13*
'AC Francis'	15302	Канада	ранние	*Pc68*
Нарпс	15319	Россия (Ленинградская область)	ранние	*Pc39*
Без названия	15021	Россия (Ленинградская область)	ранние	*Pc39*

Примечание: (–) – нет данных о наличии генов *Pc*; ранние (86–95 суток); среднеспелые (96–105 суток)
Note: (–) no data on the presence of *Pc* genes; early (86–95 days); midseason (96–105 days)

Таблица 2. **Погодные условия в годы исследований (по данным агрометеостанции «Тюмень», пос. Московский)**
Table 2. **Weather conditions during the years of studies (according to the Tyumen Agrometeorological Station, Moskovsky Settlem.)**

Месяц / Month	ГТК Селянинова / Selyaninov's HTC		Сумма осадков, мм / Precipitation amount, mm			Среднесуточная температура воздуха, °С / Mean daily air temperature, °С		
	2023	2024	2023	2024	ср. мн.	2023	2024	ср. мн.
Май	0,0	1,6	2	40	44	14,3	8,3	12
Июнь	1,7	1,8	86	100	61	16,6	18,6	17
Июль	0,8	0,9	54	54	87	22	19,3	18,7
Август	0,4	2,0	20	95	61	17	15,6	16,1
Сентябрь	0,3	0,6	10	21	45	12,3	12	10

и влажным, что способствовало благоприятному росту и развитию овса.

Посев родительских форм овса для гибридизации проводили 16 мая 2023 г. Делянки площадью 1 м^2 размещали через 40 см друг от друга, высевали вручную по 500 зерен на 1 м^2 в рядки с междурядьями 20 см на глубину 5 см. Гибриды первого поколения (F_1) высевали в 2024 г. в гибридном питомнике по схеме ♀P–F_1–♂P с междурядьями 20 см, расстоянием между растениями 10 см, длиной рядка 1 м, в однократной повторности. Сравнительный анализ родительских и гибридных форм овса проводили в лаборатории после уборочных работ на каждом растении по следующим показателям: высота растения; длина метелки; число и масса зерен с растения; объем выборки для каждого образца составил 10 растений. Наблюдения, оценки и учеты урожая проводили в соответствии с методическими указаниями по изучению мировой коллекции ячменя и овса (Loskutov et al., 2012) и «Международным классификатором СЭВ рода *Avena* L.» (International COMECON list..., 1984).

Истинный гетерозис оценивали как процент превышения значения признака у гибрида F_1 над значениями лучшего родителя по формуле (Omarov, 1975):

$$\Gamma_{ист} = \frac{F_1}{P_{луч}} \times 100 \quad (1)$$

Коэффициент истинного гетерозиса рассчитывали по Д. С. Омарову (Omarov, 1975). Характер наследования признаков определяли по коэффициенту фенотипического доминирования:

$$H_p = \frac{F_1\text{-}MP}{HP\text{-}MP} \times 100 \quad (2)$$

где F_1 – это значение изучаемого признака у гибрида; *Hp* – наилучший показатель у одной из исходных форм; *MP* – среднее значение признака у исходных форм. Если *Hp* < –1, то наблюдается отрицательное сверхдоминирование; *Hp* от –1 до 1 – промежуточное наследование (неполное доминирование); если *Hp* > 1 – положительное сверхдоминирование (Frantsuzenok et al., 2023).

Статистический анализ результатов исследований, таких как среднее арифметическое, ошибка среднего, стандартное отклонение, t-критерий и коэффициент вариации, проводили в Microsoft Excel, различия считали достоверными при $p \leq 0,05$ (Dospekhov, 2011).

Результаты

В 2023 г. создан исходный материал овса по 14 комбинациям скрещивания, была проведена кастрация 616 цветков, средний процент завязываемости семян составил 8,95% по всем комбинациям (табл. 3).

Таблица 3. Гибридные комбинации овса посевного, 2023 г.
Table 3. Hybrid combinations of common oat, 2023

Шифр комбинации / Combination cipher	Гибридная комбинация / Hybrid combination	Группа спелости / Maturity group
A1	'AC Medalion' × 'Тоболяк'	ранние
A2	'AC Francis' × 'Тоболяк'	ранние
A3	'Тоболяк' × 'AC Francis'	среднеспелые
A4	'AC Francis' × 'Фома'	ранние
A5	'Фома' × к-15021	ранние
A6	к-15021 × 'Фома'	среднеспелые
A7	к-15021 × 'Тоболяк'	среднеспелые
A8	'Тоболяк' × Нарпс (РС 39)	ранние
A9	Нарпс × 'Тоболяк'	ранние
A10	Нарпс × 'Фома'	ранние
A11	'Фома' × Нарпс	среднеспелые
A12	'Фома' × 'РС 68'	ранние
A13	Нарпс × 'Отрада'	среднеспелые
A14	'Отрада' × к-15021	ранние

Примечание: ранние (86–95 суток); среднеспелые (96–105 суток)
Note: early (86–95 days); midseason (96–105 days)

Низкая завязываемость зерен в 2023 г. связана с высокой температурой воздуха (отклонение – 10°С) и отсутствием осадков в период опыления, что привело к потере фертильности пыльцы. Данное явление согласуется с выводами других исследователей (Rodionova et al., 1994) о том, что высокая температура и засуха в фазе цветения приводит к образованию стерильных метелок.

Высота растений является важным селекционным признаком, определяющим устойчивость овса к полеганию и общую биомассу. Высота гибридных форм характеризовалась широкой амплитудой изменчивости – от 78,0 см ('Отрада' × к-15021) до 130,0 см (Нарпс × 'Отрада'). Максимальное значение признака зафиксировано у гибрида Нарпс × 'Отрада'. У родительских форм высота варьировала в диапазоне от 91,0 см ('AC Francis') до 119,8 см ('Тоболяк') (табл. 4). Статистически достоверные различия при сравнении гибрида F_1 с обеими родительскими формами отмечены в комбинациях 'Тоболяк' × 'AC Francis', 'AC Francis' × 'Фома', 'Фома' × к-15021, Нарпс × 'Фома', 'Фома' × 'РС 68' и Нарпс × 'Отрада'. Также различия значимы при сравнении гибридной комбинации 'AC Medalion' × 'Тоболяк' и P_1 ('AC Medalion', к-14914), 'AC Francis' × 'Тоболяк' и P_1 ('AC Francis', к-15302), 'Фома' × Нарпс и P_1 ('Фома', к-15451). Истинный гетерозис проявился в комбинациях: 'Отрада' × к-15021, 'AC Francis' × 'Фома', 'Тоболяк' × 'AC Francis', 'Фома' × к-15021, к-15021 × 'Фома', Нарпс × 'Фома', 'Фома' × Нарпс, 'Фома' × 'РС 68', Нарпс × 'Отрада' (см. табл. 4).

Степень фенотипического доминирования в гибридных комбинациях 'Тоболяк' × 'AC Francis', 'AC Francis' × 'Фома', к-15021 × 'Фома', Нарпс × 'Фома', 'Фома' × Нарпс, 'Фома' × 'РС 68', Нарпс × 'Отрада' (*Hp* = 1,22…61,00) показала положительное сверхдоминирование по признаку «высота растения». В комбинациях 'AC Medalion' × 'Тоболяк' и 'AC Francis' × 'Тоболяк' наблюдается промежуточное наследование (*Hp* = 0,74…1,02). Отрицательное сверхдоминирование отмечено в гибридных комбинациях 'Фома' × к-15021, к-15021 × 'Тоболяк', 'Тоболяк' × Нарпс, Нарпс × 'Тоболяк' и 'Отрада' × к-15021 (*Hp* = –4,45…–0,10) (табл. 5).

Длина главной метелки у гибридных форм варьировала от 11,0 см до 27,0 см. Наибольший показатель по длине главной метелки имел гибрид 'Тоболяк' × Нарпс. У родительских форм значения варьировали от 17,6 см ('AC Francis') до 24,8 см ('Тоболяк'). Коэффициент вариации у сорта 'AC Francis' составил 18,01%, у сорта 'Тоболяк' – 9,08%. При сравнении гибрида F_1 с обеими родительскими формами были отмечены статистически достоверные различия в комбинациях 'AC Francis' × 'Фома', 'Тоболяк' × Нарпс, Нарпс × 'Отрада' (см. табл. 4).

Истинный гетерозис получен в комбинациях 'AC Medalion' × 'Тоболяк', 'Тоболяк' × 'AC Francis', 'AC Francis' × 'Фома', 'Фома' × к-15021, 'Тоболяк' × Нарпс, Нарпс × 'Фома',

Таблица 4. Сравнительная оценка гибридных комбинаций первого поколения (F_1) с родительскими формами овса по высоте растений и длине метелки (фаза полной спелости зерна), 2024 г.

Table 4. Comparative assessment of the first-generation (F_1) hybrid combinations with parent forms of oat according to plant height and panicle length (full grain ripeness phase), 2024

Шифр комбинации / Combination cipher	Высота растений, X ± S_x, см / Plant height, X ± S_x, cm			Длина метелки, X ± S_x, см / Panicle length, X ± S_x, cm		
	F_1	P_1	P_2	F_1	P_1	P_2
A1	120,0 ± 0,00	93,9 ± 4,09*	119,8 ± 2,02	25,0 ± 0,00	19,9 ± 0,55*	24,8 ± 0,71
A2	116,0 ± 0,00	91,0 ± 4,42*	119,8 ± 2,02	24,0 ± 0,00	17,6 ± 1,00*	24,8 ± 0,71
A3	129,0 ± 0,00	119,8 ± 2,02*	91,0 ± 4,42*	25,0 ± 0,00	24,8 ± 0,71	17,6 ± 1,00*
A4	125,3 ± 2,01	91,0 ± 4,42*	107,0 ± 1,97*	25,0 ± 0,84	17,6 ± 1,00*	21,6 ± 0,50*
A5	117,0 ± 1,34	107,0 ± 1,97*	106,8 ± 2,62*	23,0 ± 0,45	21,6 ± 0,50	23,0 ± 0,75
A6	113,0 ± 3,30	106,8 ± 2,62	107,0 ± 1,97	22,7 ± 1,32	23,0 ± 0,75	21,6 ± 0,50
A7	112,7 ± 1,60	106,8 ± 2,62	119,8 ± 2,02	22,2 ± 0,68	23,0 ± 0.75	24,8 ± 0,71
A8	107,0 ± 5,81	119,8 ± 2,02	115,1 ± 1,76	27,0 ± 0,45	24,8 ± 0,71*	21,9 ± 0,50*
A9	115,2 ± 3,04	115,1 ± 1,76	119,8 ± 2,02	23,4 ± 0,42	21,9 ± 0,50*	24,8 ± 0,71
A10	122,0 ± 0,00	115,1 ± 1,76*	107,0 ± 1,97*	23,0 ± 0,00	21,9 ± 0,50	21,6 ± 0,50*
A11	116,0 ± 0,45	107,0 ± 1,97*	115,1 ± 1,76	19,5 ± 0,67	21,6 ± 0,50	21,9 ± 0,50
A12	117,3 ± 1,84	107,0 ± 1,97*	103,2 ± 2,09*	21,4 ± 0,52	21,6 ± 0,50	19,5 ± 0,34*
A13	130,0 ± 0,00	115,1 ± 1,76*	106,9 ± 2,20*	25,0 ± 0,00	21,9 ± 0,50*	22,2 ± 0,77*
A14	78,0 ± 0,00	106,9 ± 2,20	106,8 ± 2,62	11,0 ± 0,00	22,2 ± 0,77	23,0 ± 0,75

Примечание: * – различия статистически достоверны при сравнении F_1 и P_1–P_2; F_1 – гибриды 1-го поколения; P_1–P_2 – родительские формы

Note: * – differences are statistically significant when comparing F_1 and P_1–P_2; F_1 – first-generation hybrids; P_1–P_2 – parent forms

Нарпс × ‘Отрада’. Положительное сверхдоминирование проявлялось у признака «длина главной метелки» в гибридных комбинациях ‘AC Medalion’ × ‘Тоболяк’, ‘Тоболяк’ × ‘AC Francis’, ‘AC Francis’ × ‘Фома’, ‘Тоболяк’ × Нарпс, Нарпс × ‘Фома’, и Нарпс × ‘Отрада’ (*Hp* = 1,06…19,67). Комбинации ‘AC Francis’ × ‘Тоболяк’, ‘Фома’ × к-15021, к-15021 × ‘Фома’, Нарпс × ‘Тоболяк’, ‘Фома’ × ‘РС 68’ характеризовались промежуточным характером наследования признака (*Hp* = 0,03…1,00). Отрицательное сверхдоминирование отмечено в комбинациях к-15021 × ‘Тоболяк’, ‘Фома’ × Нарпс и ‘Отрада’ × к-15021 (*Hp* = –29…–1,93) (см. табл. 5).

Число зерен с растения является одним из ключевых показателей для отбора и дальнейшего использования в селекции продуктивных генотипов овса. Признак у гибридных форм варьировал в пределах от 19,0 (‘Отрада’ × к-15021) (CV = 0,0%) до 189,5 зерен (‘Тоболяк’ × Нарпс) (CV = 11,6%). У родительских форм среднее число зерен варьировало от 55,7 шт. (‘РС 68’) до 136,4 шт. (‘Тоболяк’). Коэффициент вариации у сорта ‘РС 68’ составил 25,43% и 21,81% у сорта ‘Тоболяк’. В большинстве случаев гибриды превосходили исходные формы по озерненности метелки. В метелках гибридных комбинаций к-15021 × ‘Фома’, к-15021 × ‘Тоболяк’, Нарпс × ‘Фома’, ‘Фома’ × Нарпс и ‘Отрада’ × к-15021 число зерен было достоверно ниже по сравнению с материнской и отцовской формами (рис. 1).

Истинный гетерозис получен в комбинациях ‘AC Medalion’ × ‘Тоболяк’, ‘AC Francis’ × ‘Тоболяк’, ‘Тоболяк’ × ‘AC Francis’, ‘AC Francis’ × ‘Фома’, ‘Фома’ × к-15021, ‘Тоболяк’ × Нарпс, Нарпс × ‘Отрада’. Большая часть (50%) гибридов имела положительное сверхдоминирование (*Hp* = 1,19…6,20). Гибридные комбинации Нарпс × ‘Тоболяк’, ‘Фома’ × ‘РС 68’ проявили промежуточный характер наследования (0,16…0,73). Эффект отрицательного сверхдоминирования наблюдается у гибридов к-15021 × ‘Фома’, к-15021 × ‘Тоболяк’, Нарпс × ‘Фома’, ‘Фома’ × Нарпс и ‘Отрада’ × к-15021 (*Hp* = –5,43…–1,14).

У гибридных форм масса зерен в среднем была в пределах от 0,59 г (‘Отрада’ × к-15021) до 6,44 г (‘Тоболяк’ × ‘AC Francis’) (табл. 6). Гибрид ‘Тоболяк’ × ‘AC Francis’ имел наибольшую массу зерна. У родительских форм масса зерен варьировала от 2,19 (‘РС 68’) до 4,88 г (‘Тоболяк’). Различия статистически достоверны в комбинациях ‘AC Francis’ × ‘Тоболяк’, ‘Тоболяк’ × ‘AC Francis’, ‘Тоболяк’ × Нарпс, Нарпс × ‘Отрада’ при сравнении с обеими родительскими формами. У гибридов к-15021 × ‘Фома’, к-15021 × ‘Тоболяк’ и ‘Отрада’ × к-15021 в значениях по массе зерен статистических различий не обнаружено (см. табл. 6).

Истинный гетерозис по параметру массы зерен отмечен в гибридных комбинациях: ‘AC Francis’ × ‘Тоболяк’, ‘Тоболяк’ × ‘AC Francis’, ‘AC Francis’ × ‘Фома’, ‘Фома’ × к-15021, ‘Тоболяк’ × Нарпс, Нарпс × ‘Отрада’ (рис. 2). Наследование признака массы зерен с одного растения выше-

Таблица 5. **Характер наследования количественных признаков гибридов первого поколения (F_1)**
Table 5. **The inheritance pattern of quantitative characters in the first-generation hybrids (F_1)**

Шифр комбинации / Combination cipher	Коэффициент фенотипического доминирования / Phenotypic dominance coefficient			
	Высота растений / Plant height	Длина метелки / Panicle length	Число зерен / Grain number per plant	Масса зерен / Grain weight per plant
A1	1,02	1,08	1,57	0,55
A2	0,74	0,78	1,71	2,06
A3	1,64	1,06	1,19	2,18
A4	3,29	2,70	1,24	1,18
A5	–101,00	1,00	6,20	1,97
A6	61,00	0,52	–3,93	–1,28
A7	–0,10	–1,93	–1,14	–0,73
A8	–4,45	2,52	3,93	2,66
A9	–0,96	0,03	0,16	0,23
A10	2,70	8,33	–2,59	0,29
A11	1,22	–15,00	–4,06	0,03
A12	6,41	0,84	0,73	0,81
A13	4,63	19,67	5,69	3,75
A14	–577,00	–29,00	–5,43	–3,67

перечисленных гибридов проходило по типу положительного сверхдоминирования (*Hp* = 1,18…3,75). Отрицательное сверхдоминирование отмечено в гибридных комбинациях к-15021 × 'Фома', к-15021 × 'Тоболяк' и 'Отрада' × к-15021 (*Hp* = –3,67…–0,73). Оставшиеся гибриды характеризовались неполным доминированием признака (*Hp* = 0,03…0,81) (см. табл. 6).

Обсуждение

Высота растений овса является одним из важнейших морфологических признаков, потенциально влияющих на устойчивость растений к полеганию. Полегание, в свою очередь, наносит существенный ущерб урожаю, что приводит к снижению качества зерна. Как отмечает А. В. Любимова (Lyubimova et al., 2025), для борьбы с полеганием овса необходимо выводить сорта с генами короткостебельности. Выявленная в нашем исследовании статистически значимая дифференциация гибридов по высоте подтверждает наличие широкой генетической вариабельности исходного материала, что позволяет вести отбор на оптимальный габитус растения овса посевного.

В исследованиях Е. А. Стрельникова (Strelnikov, 2021) отмечено, что показатель «степень фенотипического доминирования» используется у многих культур для оценки селекционного материала на ранних этапах. Наши данные подтверждают возможность применения этого

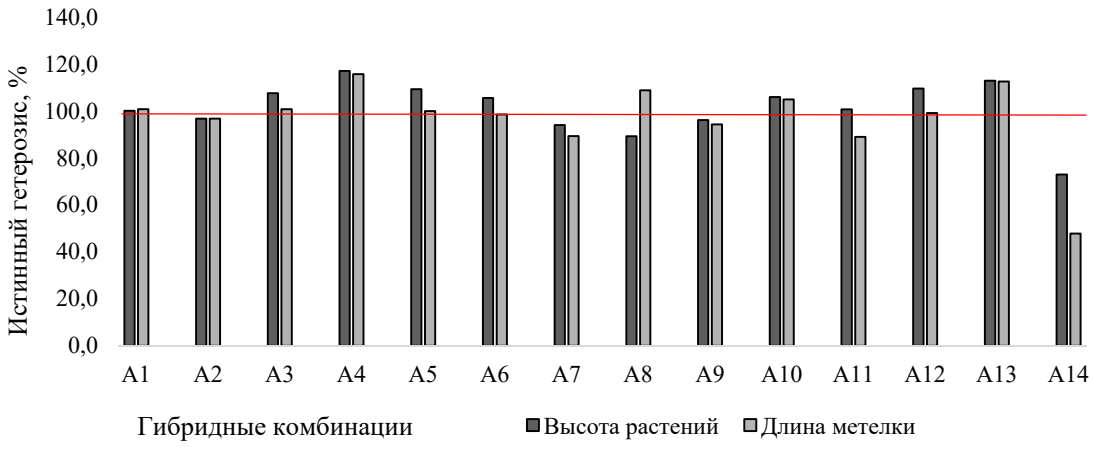


Рис. 1. **Эффект гетерозиса у гибридов первого поколения по высоте растений и длине метелки, %**
Fig. 1. **The effect of heterosis in the first-generation hybrids for plant height and panicle length, %**

Таблица 6. Сравнительная оценка гибридных комбинаций первого поколения (F_1) с родительскими формами овса по числу и массе зерен с растения, 2024 г.

Table 6. Comparative assessment of the first-generation (F_1) hybrid combinations with parent forms of oat according to the number and weight of grains per plant, 2024

Шифр комбинации / Combination cipher	Число зерен с растения, X ± S_x, шт. / Grain number per plant, X ± S_x, pcs.			Масса зерен с растения, X ± S_x, г / Grain weight per plant, X ± S_x, g		
	F_1	P_1	P_2	F_1	P_1	P_2
A1	156,0 ± 0,00	67,4 ± 6,68*	136,4 ± 9,41*	4,42 ± 0,00	2,82 ± 0,29*	4,88 ± 0,36
A2	165,0 ± 0,00	55,9 ± 5,69*	136,4 ± 9,41*	6,28 ± 0,00	2,23 ± 0,25*	4,88 ± 0,36*
A3	144,0 ± 0,00	136,4 ± 9,41	55,9 ± 5,69*	6,44 ± 0,00	4,88 ± 0,36*	2,23 ± 0,25*
A4	101,7 ± 6,81	55,9 ± 5,69*	96,7 ± 7,21	4,42 ± 0,41	2,23 ± 0,25*	4,25 ± 0,34
A5	123,5 ± 12,75	96,7 ± 7,21	86,4 ± 3,38*	4,97 ± 0,34	4,25 ± 0,34	2,76 ± 0,16*
A6	71,3 ± 4,08	86,4 ± 3,38	96,7 ± 7,21	2,55 ± 0,17	2,76 ± 0,16	4,25 ± 0,34
A7	83,0 ± 10,70	86,4 ± 3,38	136,4 ± 9,41	3,05 ± 0,43	2,76 ± 0,16	4,88 ± 0,36
A8	189,5 ± 6,93	136,4 ± 9,41*	100,1 ± 5,69*	6,07 ± 0,36	4,88 ± 0,36*	3,44 ± 0,17*
A9	121,2 ± 6,11	100,1 ± 5,69	136,4 ± 9,41	4,33 ± 0,21	3,44 ± 0,17*	4,88 ± 0,36
A10	94,0 ± 0,00	100,1 ± 5,69	96,7 ± 7,21	3,96 ± 0,00	3,44 ± 0,17*	4,25 ± 0,34
A11	91,5 ± 11,40	96,7 ± 7,21	100,1 ± 5,69	3,86 ± 0,63	4,25 ± 0,34	3,44 ± 0,17
A12	91,1 ± 8,93	96,7 ± 7,21	55,7 ± 4,48*	4,05 ± 0,35	4,25 ± 0,34	2,19 ± 0,20*
A13	156,0 ± 0,00	100,1 ± 5,69*	116,8 ± 7,40*	5,67 ± 0,00	3,44 ± 0,17*	4,38 ± 0,28*
A14	19,0 ± 0,00	116,8 ± 7,40	86,4 ± 3,38	0,59 ± 0,00	4,38 ± 0,28	2,76 ± 0,16

Примечание: * – различия статистически достоверны при сравнении F_1 и P_1–P_2; F_1 – гибриды 1-го поколения; P_1–P_2 – родительские формы

Note: * – differences are statistically significant when comparing F_1 and P_1–P_2; F_1 – first-generation hybrids; P_1–P_2 – parent forms

показателя при подборе пар для скрещивания, а также для быстрой оценки гибридного потомства.

Особое значение имеет проявление истинного гетерозиса в гибридных комбинациях, что свидетельствует о преобладании положительных эффектов доминирования и повышения высоты гибридов по сравнению с родителями. Высокие показатели фенотипического доминирования (*Hp* = 1,22…61,00) в гибридных комбинациях ‘Тоболяк’ × ‘AC Francis’, ‘AC Francis’ × ‘Фома’, ‘Фома’ × к-15021, к-15021 × ‘Фома’, Нарпс × ‘Фома’, ‘Фома’ × Нарпс, ‘Фома’ × ‘РС 68’ и Нарпс × ‘Отрада’ указывают на положительное сверхдоминирование, то есть гибриды превосходят родителей по высоте. В других комбинациях наблюдается промежуточное или отрицательное сверхдоминирование, что отражает разнообразие наследования. Эффект гетерозиса по признаку «высота растений» не про-

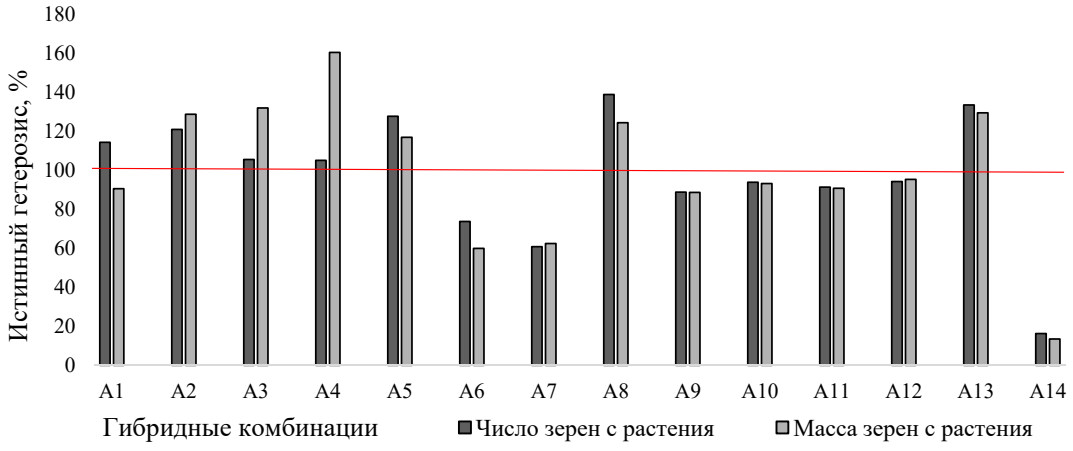


Рис. 2. Эффект гетерозиса у гибридов первого поколения по количеству и массе зерен с растения, %

Fig. 2. The effect of heterosis in the first-generation hybrids for the number and weight of grains per plant, %

явился в комбинациях ‘AC Francis’ × ‘Тоболяк’, к-15021 × ‘Тоболяк’, ‘Тоболяк’ × Нарпс, Нарпс × ‘Тоболяк’, ‘Отрада’ × к-15021. Наименьшая высота (73,0 см) представлена у гибридной комбинации ‘Отрада’ × к-15021, а наибольшая (96,8 см) была отмечена у гибридной комбинации ‘AC Francis’ × ‘Тоболяк’.

Длина главной метелки у гибридных форм была в пределах от 11,0 до 27,0 см, что свидетельствует о значительном разнообразии по этому признаку. Истинный гетерозис, наблюдавшийся в гибридных комбинациях, подтверждает усиление признака за счет аллельных взаимодействий. Положительное сверхдоминирование выявлено в комбинациях ‘AC Medalion’ × ‘Тоболяк’, ‘Тоболяк’ × ‘AC Francis’, ‘AC Francis’ × ‘Фома’, ‘Тоболяк’ × Нарпс, Нарпс × ‘Фома’, Нарпс × ‘Отрада’, что говорит об устойчивом преобладании гибридных признаков над родительскими формами. Промежуточное наследование и отрицательное сверхдоминирование в гибридах показывают разнообразие взаимодействий и необходимость отбора наиболее перспективных комбинаций.

Большинство гибридных комбинаций показали преимущество по признаку «число зерен с растения» по сравнению с родительскими формами, что говорит о наличии истинного гетерозиса и повышении урожайности гибридов. Однако у гибридов к-15021 × ‘Фома’, к-15021 × ‘Тоболяк’, Нарпс × ‘Фома’, ‘Фома’ × Нарпс и ‘Отрада’ × к-15021 значение озерненности было достоверно ниже, что свидетельствует об отсутствии гетерозиса в этих комбинациях.

По данным Н. В. Кротовой и Г. А. Баталовой (Krotova, Batalova, 2020), важным параметром при выведении высокопродуктивных сортов овса считается масса зерен с растения, так как она напрямую влияет на продуктивность урожая и качество зерна. Истинный гетерозис и положительное сверхдоминирование отмечены в ‘AC Francis’ × ‘Тоболяк’, ‘Тоболяк’ × ‘AC Francis’, ‘AC Francis’ × ‘Фома’, ‘Фома’ × к-15021, ‘Тоболяк’ × Нарпс, Нарпс × ‘Отрада’, что говорит о высокой продуктивности этих гибридных комбинаций и возможности их использования для увеличения урожайности. Гибридные комбинации к-15021 × ‘Фома’, к-15021 × ‘Тоболяк’ и ‘Отрада’ × к-15021 характеризуются отрицательным сверхдоминированием, показывая снижение массы зерен. Масса зерен в гибридных комбинациях существенно варьирует, у большинства гибридов отмечен эффект гетерозиса, что важно учитывать при селекционном отборе.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что у всех 14 изученных гибридов первого поколения (F_1) гетерозис отмечен одновременно по четырем хозяйственно ценным признакам: высота растения, длина метелки, число и масса зерен с растения. По комплексу признаков выделены перспективные гибридные комбинации: ‘Тоболяк’ × ‘AC Francis’, ‘AC Francis’ × ‘Фома’, ‘Фома’ × к-15021, Нарпс × ‘Отрада’, которые могут быть рекомендованы для дальнейших этапов селекции при создании высокопродуктивных и адаптивных сортов овса. По степени доминирования и эффекта гетерозиса самые высокие показатели по изученным признакам получены в гибридных комбинациях ‘Тоболяк’ × ‘AC Francis’, ‘AC Francis’ × ‘Фома’, Нарпс × ‘Отрада’, представляющих ценный материал для отбора на повышение генетического потенциала овса в Северном Зауралье.

References / Литература

Bogomolov M.A., Vostrikova T.V. Some aspects of the manifestation of heterosis in sugar beet hybrids (Nekotorye aspekty proyavleniya geterozisa u gibridov sakharnoy svyokly). *Sugar*. 2022;(3):46-49. [in Russian] (Богомолов М.А., Вострикова Т.В. Некоторые аспекты проявления гетерозиса у гибридов сахарной свёклы. *Сахар*. 2022;(3):46-49). DOI: 10.24412/2413-5518-2022-3-46-49

Dospekhov B.A. Methodology of field trial (with fundamentals of statistical processing of research results) (Metodika polevogo opyta [s osnovami statisticheskoy obrabotki rezultatov issledovaniy]). 6th ed. Moscow: Alyans; 2011. [in Russian] (Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 6-е изд. Москва: Альянс; 2011).

Duktova N.A., Kuznetsova N.A. The manifestation of the heterotic effect and the nature of inheritance of plant productivity traits in intraspecific durum wheat hybrids (Proyavleniye geterozisnogo effekta i kharakter nasledovaniya priznakov produktivnosti rasteniya u vnutrividovykh gibridov pshenitsy tverdoy). *Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy*. 2018;(4):111-114. [in Russian] (Дуктова Н.А., Кузнецова Н.А. Проявление гетерозисного эффекта и характер наследования признаков продуктивности растения у внутривидовых гибридов пшеницы твердой. *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. 2018;(4):111-114).

Frantsuzenok A.V., Pugacheva I.G., Leshchina N.Yu., Babak O.G., Kilchevsky A.V., Gasanov S.R. et al. The manifestation of true heterosis and the nature of inheritance of yield characteristics in F_1 tomato hybrids in the open ground (Proyavleniye istinnogo geterozisa i kharakter nasledovaniya priznakov urozhaynosti u gibridov tomata F_1 v otkrytom grunte). *Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy*. 2023;(3):121-125. [in Russian] (Французенок А.В., Пугачева И.Г., Лещина Н.Ю., Бабак О.Г., Кильчевский А.В., Гасанов С.Р. и др. Проявление истинного гетерозиса и характер наследования признаков урожайности у гибридов томата F_1 в открытом грунте. *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. 2023;(3):121-125).

International COMECON list of descriptors for *Avena* L. Leningrad: VIR; 1984. [in Russian] (Международный классификатор СЭВ рода *Avena* L. Ленинград: ВИР; 1984).

Kilchevsky A.V., Khotyleva L.V., Tarutina L.A., Shapturenko M.N. Heterosis in the breeding of agricultural plants (Geterozis v selektsii selskokhozyaystvennykh rasteniy). *Molecular and Applied Genetics*. 2008;8:7-24. [in Russian] (Кильчевский А.В., Хотылева Л.В., Тарутина Л.А., Шаптуренко М.Н. Гетерозис в селекции сельскохозяйственных растений. *Молекулярная и прикладная генетика*. 2008;8:7-24).

Krotova N.V., Batalova G.A. Inheritance of the main economically valuable traits by spring oat hybrids F_1 in the Volga-Vyatka region. In: *Methods and Technologies in Plant Breeding and Crop Production (Metody i tekhnologii v selektsii rasteniy i rasteniyevodstve): Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 125th Anniversary of the Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky*. Kirov; 2020. p.109-114. [in Russian] (Кротова Н.В., Баталова Г.А. Наследование основных хозяйственно ценных признаков гибридами F_1 ярового овса в условиях Волго-Вятского региона. В кн.: *Методы и технологии в селекции рас-*

тений и растениеводстве: материалы VI Международной научно-практической конференции, посвященной 125-летию Федерального аграрного научного центра Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого. Киров; 2020. С.109-114).

Litun P.P., Kirichenko V.V., Bondarenko L.V. Heterosis according to traits with systemic control in plants, and its prediction (Geterozis po priznakam s sistemnym kontrolem u rasteniy i yego prognozirovaniye). In: *Works on Fundamental and Applied Genetics (Dedicated to the 100th Anniversary of Genetics) (Trudy po fundamentalnoy i prikladnoy genetike [k 100-letnemu yubileyu genetiki])*. Kharkiv: Shtrikh; 2001. p.151-169. [in Russian] (Литун П.П., Кириченко В.В., Бондаренко Л.В. Гетерозис по признакам с системным контролем у растений и его прогнозирование. В кн.: *Труды по фундаментальной и прикладной генетике (к 100-летнему юбилею генетики)*. Харьков: Штрих; 2001. С.151-169).

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).

Lukomets V.M., Tishkov N.M., Baranov V.F., Piven V.T., Shulyak I.I. Toro Correa H.A. Methods of conducting agronomic experiments with oilseed crops (Metodika provedeniya agrotekhnicheskikh opytov s maslichnymi kulturami). 2nd ed. Krasnodar; 2010. [in Russian] (Лукомец В.М., Тишков Н.М., Баранов В.Ф., Пивень В.Т., Шуляк И.И., Торо Корреа У.А. Методика проведения агротехнических опытов с масличными культурами. 2-е изд. Краснодар; 2010).

Lyubimova A.V., Eremin D.I., Akhtyamova A.A. Influence of the dwarfing gene *Dw6* on the height of oat plants in F_1–F_2 populations. In: *Priority Areas for Improving the Efficiency, Competitiveness and Sustainability of the Agricultural Sector (Prioritetnye napravleniya povysheniya effektivnosti, konkurentosposobnosti i ustoychivosti agrarnoy otrasli): Proceedings of the International Scientific Conference Dedicated to the 105th Anniversary of the Tatar Research Institute of Agriculture, Kazan Scientific Center, RAS*. St. Petersburg: Scientia; 2025. p.101-105. [in Russian] (Любимова А.В., Ерёмин Д.И., Ахтямова А.А. Влияние гена короткостебельности *Dw6* на высоту растений овса в популяциях F_1–F_2. В кн.: *Приоритетные направления повышения эффективности, конкурентоспособности и устойчивости аграрной отрасли: материалы международной научной конференции, посвященной 105-летию ТатНИИСх ФИЦ КазНЦ РАН*. Санкт-Петербург: Сциентиа; 2025. С.101-105). DOI: 10.32415/scientia_978-5-907902-43-5(101-105)

Mansapova A.I., Pyko T.Yu., Berendeeva L.O. Cultivation of new oat cultivars in the subtaiga of Omsk Province. Practical manual (Vozdelyvaniye novykh sortov ovsa v usloviyakh podtaygi Omskoy oblasti. Prakticheskoye posobiye). Omsk; 2020. [in Russian] (Мансапова А.И., Пыко Т.Ю., Берендеева Л.О. Возделывание новых сортов овса в условиях подтайги Омской области. Практическое пособие. Омск; 2020).

Omarov D.S. To the method of recording and assessing heterosis in plants (K metodike ucheta i otsenki geterozisa u rasteniy). *Agricultural Biology*. 1975;10:123-127. [in Russian] (Омаров Д.С. К методике учета и оценки гетерозиса у растений. *Сельскохозяйственная биология*. 1975;10:123-127).

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).

Strelnikov E.A. Effect of heterosis and phenotypic dominance in interline hybrids of winter rapeseed. In: *Current Issues of Crop Biology, Breeding, Cultivation and Processing Technologies (Aktualnye voprosy biologii, selektsii, tekhnologii vozdelyvaniya i pererabotki selskokhozyaystvennykh kultur): Proceedings of the 11th All-Russian Conference for Young Scientists and Specialists*. Krasnodar; 2021. p.115-120. [in Russian] (Стрельников Е.А. Эффект гетерозиса и фенотипического доминирования у межлинейных гибридов рапса озимого. В кн.: *Актуальные вопросы биологии, селекции, технологии возделывания и переработки сельскохозяйственных культур: сборник материалов 11-й Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов*. Краснодар; 2021. С.115-120). DOI: 10.25230/conf11-2021-115-120

Tautekenova A.K., Mamaeva V.S., Eremin D.I. The model of the variety as the basis of marker selection of oats for Western Siberia (analytical review). *Epokha nauki = The Epoch of Science*. 2022;(31):188-194. [in Russian] (Таутекенова А.К., Мамаева В.С., Ерёмин Д.И. Модель сорта как основа маркерной селекции овса посевного для Западной Сибири (аналитический обзор). *Эпоха науки*. 2022;(31):188-194). DOI: 10.24412/2409-3203-2022-31-188-194

Информация об авторах

Азия Кайсаровна Таутекенова, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северного Зауралья – филиал ТюмНЦ СО РАН, 625501 Россия, Тюменская обл., Тюменский р-н, п. Московский, ул. Бурлаки, 2, atautekenova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8964-4010

Нина Анатольевна Боме, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующая кафедрой, Тюменский государственный университет, 625003 Россия, Тюмень, ул. Володарского, 6, bomena@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5467-6538

Information about the authors

Aziya K. Tautekenova, Associate Researcher, Tyumen Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Research Institute of Agriculture for the Northern Trans-Ural Region – branch of the TSC SB RAS, 2 Burlaki St., Moskovsky

Settlem., Tyumensky District, Tyumen Province 625501, Russia, atautekenova@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8964-4010

Nina A. Bome, Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Head of a Department, University of Tyumen, 6 Volodarskogo St., Tyumen 625003, Russia, bomena@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5467-6538

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 21.01.2026; одобрена после рецензирования 21.04.2026; принята к публикации 12.05.2026.
The article was submitted on 21.01.2026; approved after reviewing on 21.04.2026; accepted for publication on 12.05.2026.

ГЕНЕТИКА КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 633.854.78
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o1

CC BY

Модификационная изменчивость содержания основных жирных кислот в семенах высокостеариновых линий подсолнечника в различных условиях выращивания

Ю. В. Чебанова[1], Я. Н. Демурин[1], И. В. Киров[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: Юлия Владимировна Чебанова, aqvablue@mail.ru

Актуальность. Высокостеариновый подсолнечник рассматривается как альтернатива импортируемому пальмовому маслу при производстве твердых растительных жиров в пищевой промышленности. Целью исследований стало изучение фенотипической изменчивости состава основных жирных кислот в семенах отечественных линий ЛГ34, ЛГ36 и ЛГ37 с высоким содержанием стеариновой и олеиновой жирных кислот в различных экологических условиях выращивания, включая камеру гидропоники.

Материалы и методы. В исследовании использовали высокостеариновые высокоолеиновые линии генетической коллекции подсолнечника Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур имени В.С. Пустовойта: ЛГ34, ЛГ36 и ЛГ37. Линии выращивали в полевых условиях в 2023 и 2024 г., а также в двух сезонах камеры гидропоники в 2024 и 2025 г. С использованием метода газожидкостной хроматографии определяли состав основных жирных кислот в масле 10 отдельных семянок изучаемых образцов.

Результаты. У изученных линий содержание стеариновой кислоты увеличилось на 10,2–12,1%, а олеиновой кислоты снизилось на 16,6–16,8% в условиях камеры гидропоники по отношению к полевым условиям. Уровень пальмитиновой кислоты был более стабильным, и изменчивость не имела подобной закономерности. С использованием ANOVA выявлено достоверное влияние условий года на уровень всех основных жирных кислот. Наиболее высокая доля влияния условий установлена для стеариновой и олеиновой кислот: 85 и 67% соответственно. Для признака содержания стеариновой кислоты обнаружена сильная отрицательная корреляция с максимальной и среднесуточной температурой воздуха ($r = -0,94$ и $r = -0,85$), тогда как с минимальной температурой отмечена положительная связь ($r = 0,86$).

Заключение. Установлено значительное модификационное увеличение содержания стеариновой и снижение олеиновой кислот в масле семян высокостеариновых линий подсолнечника при выращивании в условиях камеры гидропоники по отношению к полевым условиям.

Ключевые слова: жирная кислота, мутация, фенотипическая изменчивость, стеариновая кислота, гидропоника, температура, корреляция

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке проекта 082-3-2023-0005 в части проведения опытов в условиях камеры гидропоники и гранта РНФ № 22-64-00076 в части изучения жирнокислотного состава семян.

Для цитирования: Чебанова Ю.В., Демурин Я.Н., Киров И.В. Модификационная изменчивость содержания основных жирных кислот в семенах высокостеариновых линий подсолнечника в различных условиях выращивания. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(2):148-157. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o1

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.

© Чебанова Ю.В., Демурин Я.Н., Киров И.В., 2026

GENETICS OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o1

Phenotypic plasticity of essential fatty acid content in seeds of high-stearic sunflower lines under different growing conditions

Yulia V. Chebanova[1], Yakov N. Demurin[1], Ilya V. Kirov[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: Yulia V. Chebanova, aqvablue@mail.ru

Background. High-stearic sunflower is seen as an alternative to imported palm oil in the industrial production of solid vegetable fats. Wide phenotypic variability of fatty acid content in sunflower seeds under the influence of various growing conditions was described. In mutant high-stearic lines CAS-4 and CAS-8, a negative relationship between temperature and stearic acid content was observed. The objective was to study the phenotypic variability of essential fatty acid composition in the seeds of lines LG34, LG36 and LG37 with high content of stearic and oleic fatty acids under various environmental conditions and a hydroponic system.

Materials and methods. The study employed high-stearic and high-oleic lines LG34, LG36 and LG37 from the sunflower genetic collection of the Pustovoit Institute. They were grown in the field in 2023 and 2024, as well as in a hydroponic growth chamber for two seasons (2024 and 2025). Gas–liquid chromatography was used to analyze the composition of essential fatty acids in the oil of 10 individual achenes of the studied samples.

Results. Stearic acid content in the studied lines increased by 10.2–12.1%, and oleic acid content decreased by 16.6–16.8% in the hydroponic system, when compared to the field conditions. The level of palmitic acid was more stable, and its variability did not show such a pattern. ANOVA helped to reveal a significant effect of the year's conditions on the level of all essential fatty acids. The highest share of the environmental effect was recorded for stearic and oleic acids: 85% and 67%, respectively. For stearic acid content, a strong negative correlation was found with the maximum and mean daily air temperatures (r = –0.94 and r = –0.85), and a strong positive one with the minimum temperature (r = 0.86).

Conclusion. An increase in stearic acid content and a decrease in oleic acid content in the oil of the seeds of high-stearic sunflower lines LG34, LG36, and LG37 was established for the hydroponic conditions.

Keywords: fatty acid, mutation, phenotypic variability, stearic acid, hydroponics, temperature, correlation

Acknowledgments: this research was funded by Project #082-3-2023-0005 for hydroponic growth chamber experiments and by the Russian Science Foundation (Grant No. 22-64-00076) for studying the fatty acid composition of seeds.

For citation: Chebanova Yu.V., Demurin Ya.N., Kirov I.V. Phenotypic plasticity of essential fatty acid content in seeds of high-stearic sunflower lines under different growing conditions. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(2):148-157. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o1

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 является одним из главных источников пищевых растительных масел. Данную культуру выращивают в 72 странах, из которых наша страна является крупнейшим производителем (Rauf, 2019). В 2024 г. мировое производство семян подсолнечника составило около 52 млн тонн и 32% из них (18 млн тонн) были произведены в Российской Федерации (https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=2224000).

Традиционное подсолнечное масло содержит в сумме до 90% мононенасыщенной олеиновой (C18:1) и полиненасыщенной линолевой (18:2) жирных кислот. На другие кислоты приходится около 10%; основными из них являются насыщенные пальмитиновая (C16:0) и стеариновая (C18:0). После открытия мутаций высокоолеиновости (Soldatov et al., 1976), высокопальмитиновости и высокостеариновости (Ivanov et al., 1988; Mancha et al., 1994; Osorio et al., 1995) появились новые направления селекции подсолнечника. Подсолнечное масло с высоким содержанием стеариновой и олеиновой кислот может стать полезной альтернативой тропическому пальмовому маслу с высоким содержанием пальмитиновой кислоты, благодаря высокой окислительной стабильности и твердому состоянию. Во Всероссийском научно-исследовательском институте масличных культур имени В.С. Пустовойта (ВНИИМК) впервые в России были выведены линии-доноры с одновременно высоким содержанием стеариновой и олеиновой кислот (Chebanova et al., 2025).

Жирнокислотный состав масла семян подсолнечника определяется рядом факторов, основным из которых является генотип растения. С другой стороны, многие авторы отмечали широкую фенотипическую изменчивость содержания жирных кислот под влиянием различных условий выращивания растений подсолнечника. Наиболее значимым модификационным фактором при этом является температура воздуха в период созревания семян, которая положительно коррелирует с содержанием олеиновой кислоты и отрицательно – с линолевой. В ряде экспериментальных статей показана динамика накопления жирных кислот при созревании семян. Так, ключевым этапом в данном процессе биосинтеза жирных кислот установлен период в течение 20 дней после цветения (Guo et al., 2024).

Существуют разные мнения о том, какая циркадная температура в большей степени определяет состав жирных кислот. Колебание концентрации олеиновой кислоты в полевых условиях лучше всего объясняется максимальной (Seiler, 1983), минимальной (Rochester, Silver, 1983; Harris et al., 1989) или среднесуточной температурой (Nagao, Yamazaki, 1984). N. Izquierdo et al. (2002) пришли к выводу, что наиболее значимой температурой для определения изменчивости концентрации C18:1 является именно ночная температура. Повышение температуры может также приводить к снижению концентрации насыщенных жирных кислот (Izquierdo, Aguirrezabal, 2008). Процентное содержание линолевой, олеиновой и стеариновой кислот в семенах гибридов существенно различалось в разных регионах произрастания (Turhan et al., 2010), в то время как содержание пальмитиновой кислоты оставалось практически постоянным (Lajara et al., 1990).

Испанские ученые изучали влияние температуры выращивания на соотношение жирных кислот в семенах мутантных линий с высоким содержанием стеариновой кислоты. Уровень C18:0 в семенах контрольной линии снижался с 5,4 до 3,2% при повышении температуры выращивания, а уровень C16:0 оставался постоянным. У высокостеариновых линий CAS-4 и CAS-8 была описана отрицательная зависимость между температурой и содержанием C18:0. (Martínez-Force et al., 1998). Жирнокислотный состав другой мутантной высокостеариновой линии CAS-14 определяли в контролируемых условиях среды при различных дневных и ночных температурах. При выращивании данной линии в прохладных условиях при температурных режимах 20/10 и 25/15°C содержание стеариновой кислоты было на уровне стандартной линии – около 6,7–7,8%. При режиме 30/20°C наблюдали большую изменчивость в отдельных семенах – 5,2–33,4%. Максимальное содержание стеариновой кислоты 25,8–43,0% достигалось при высокой температуре 39/24°C. Такая закономерность полностью противоположна установленной ранее для других высокостеариновых мутантных линий CAS-4 и CAS-8 в предыдущих исследованиях (Fernández-Moya et al., 2002). Следовательно, мутационное повышение содержания стеариновой кислоты у линии CAS-14 является в значительной степени термозависимым.

Первые исследования изменчивости содержания C18:0 у линий ЛГ31, ЛГ32 и ЛГ33 из генетической коллекции ВНИИМК под влиянием погодных условий показали, что признак повышенного содержания стеариновой кислоты в масле семян подсолнечника экологически стабилен и не зависит от условий выращивания этих линий в полевых условиях. В нашей дальнейшей работе были получены новые линии ЛГ34, ЛГ36 и ЛГ37 с более высоким содержанием стеариновой кислоты, для которых аналогичное изучение вариабельности состава жирных кислот не проводили.

Во ВНИИМК в 2023 г. была запущена камера гидропоники для выращивания подсолнечника. Эта камера позволила создать контролируемые условия, отличающиеся по температуре воздуха от полевых (Demurin et al., 2024). В связи с данными техническими возможностями *целью исследований* стало изучение фенотипической изменчивости состава основных жирных кислот в семенах линий ЛГ34, ЛГ36 и ЛГ37 с высоким содержанием стеариновой и олеиновой жирных кислот в различных экологических условиях выращивания.

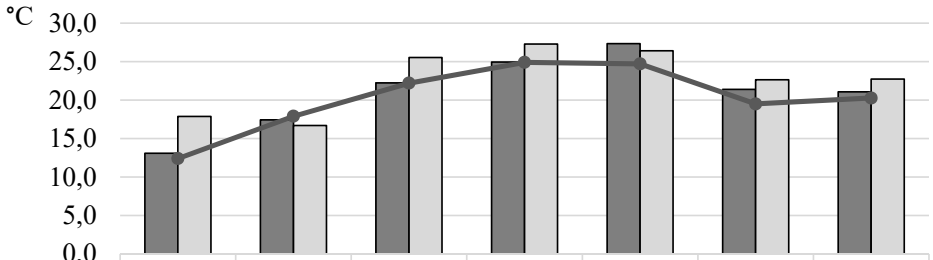
Материалы и методы

Исследования проведены во ВНИИМК, в лаборатории генетики отдела селекции и первичного семеноводства подсолнечника в период 2023–2025 гг. Опыты закладывали в полевых условиях на 2-м отделении в хуторе Октябрьском г. Краснодара в 2023 и 2024 г. и в камере гидропоники в 2024 и 2025 г.

Для создания благоприятных микроклиматических условий в камере гидропоники использовали системы кондиционирования и осушения воздуха. Контроль температуры и влажности воздуха осуществляли с помощью электронных систем, установленных в камере. Влажность воздуха поддерживали на уровне 50–60%. Фотопериод составил 16 часов – день, 8 часов – ночь. В качестве субстрата использовали маты, кубики и пробки из минеральной ваты. Полив растений производили с использованием специализированной установки полива на базе автоматизированной системы дозации удобрений L-502.

В полевых условиях растения выращивали по стандартной схеме при густоте стояния 40 тыс. растений на гектар. Опытные делянки включали два ряда по 25 растений каждый. Растения, отобранные для изучения, принудительно самоопыляли под индивидуальными изоляторами и после созревания семян обмолачивали отдельно каждую корзинку. В камере гидропоники опытная делянка включала 6 растений каждой линии в одном мате из минеральной ваты. Опыление и уборку растений проводили по сходной методике.

По комплексу погодных условий 2023 и 2024 г. существенно различались – как по среднесуточным температурам, так и по условиям увлажнения. Так, 2024 г. был во все месяцы, кроме мая, теплее среднемноголетней нормы на 1,7–5,5°C, и в целом за вегетационный период (ВП) превышение составило 2,5°C (рис. 1). В 2023 г. отклонение от климатической нормы было ниже. Однако, несмотря на все различия, в августе в оба года исследований среднесуточная температура была сходной и превышала среднемноголетнее значение на 1,7–2,6°C.



	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	ВП
2023	13,1	17,4	22,2	25,0	27,3	21,4	21,1
2024	17,9	16,7	25,5	27,3	26,4	22,6	22,7
Среднемноголетняя	12,4	17,9	22,2	24,9	24,7	19,5	20,3

Рис. 1. Среднесуточная температура воздуха в течение вегетационного периода в 2023 и 2024 г., °C
Fig. 1. Mean daily air temperature during the growing seasons in 2023 and 2024, °C

Количество осадков, выпавших за период вегетации подсолнечника в разные годы исследований, сильно различалось (табл. 1). В 2023 г. в течение вегетационного периода выпало на 31,6 мм больше среднемноголетней нормы, тогда как в 2024 г. данный показатель был ниже нормы на 221,8 мм. Наиболее сильные различия наблюдали в апреле и июле, тогда как в августе и сентябре в оба года исследований осадков было мало.

Уровень влагообеспеченности устанавливали по гидротермическому коэффициенту увлажнения Г. Т. Селянинова (ГТК) (Ionova et al., 2016). Согласно ГТК 2023 г. характеризовался как влагообеспеченный, а 2024 г. – как сухой (см. табл. 1).

Наиболее важным периодом в формировании жирнокислотного состава масла являются 30 дней после цветения (ДПЦ), то есть этап созревания семян. На рисунке 2 видно, что интервал изменения температур в течение суток в полевых условиях значительно выше, чем в камере гидропоники. Так, разность между минимальными и максимальными температурами в 2023 г. составила 12,7°C, а в 2024 г. – 14,3°C. В условиях камеры гидропоники данный интервал был намного ниже и составил 4,0–5,3°C. Такая изменчивость связана с тем, что в гидропонике минимальная ночная температура выше, чем в поле, а максимальная температура значительно ниже за счет постоянного охлаждения камеры до необходимой температуры.

Материалом для изучения послужили инбредные линии генетической коллекции ВНИИМК, созданные в период с 2018 по 2023 г. Данные линии содержат 17–21% C18:0 и 60–69% C18:1. Все линии относятся к средней группе спелости и являются ветвистыми линиями – восстановителями фертильности пыльцы при ЦМС PET1.

Определение жирнокислотного состава семян проводили с использованием метода газожидкостной хроматографии метиловых эфиров на приборе «Хроматэк-Кристалл 2000». Получение метиловых эфиров и их хроматографирование выполняли в соответствии с ГОСТ (GOST 31663-2012..., 2019; GOST 31665-2012..., 2019). Для определения состава жирных кислот в отдельных семенах использовали по 10 семянок.

Таблица 1. Условия увлажнения в период полевых исследований, хут. Октябрьский, Краснодар, 2023–2024 гг.
Table 1. Moisture conditions during the field research period, Oktyabrsky Farmstead, Krasnodar, 2023–2024

Параметр	Год	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	ВП
Количество осадков, мм	2023	93,6	101,6	74,2	102,4	1,0	13,4	**386,2**
	2024	5,2	71,0	6,4	15,6	14,6	20,0	**132,8**
	Среднее многолетнее	48,4	67,1	80,5	66,2	40,7	51,7	**354,6**
ГТК	2023	2,4	1,9	1,1	1,3	0,0	0,2	**1,0**
	2024	0,1	1,4	0,1	0,2	0,2	0,3	**0,3**

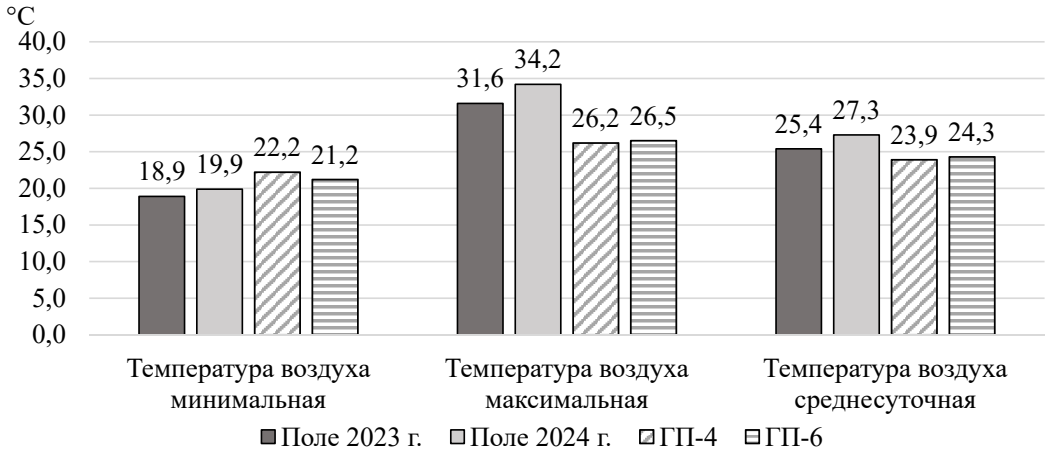


Рис. 2. Показатели температуры воздуха (°C) в период 30 дней после цветения в полевых и гидропонных (ГП) условиях

Fig. 2. Air temperature (°C) during the 30-day period after flowering in the field and in the hydroponic system (ГП)

Математическую обработку данных проводили с использованием ANOVA в Excel и программной среды R версии 4.3.1., а тест на нормальность остаточных значений – методом Шапиро – Уилка с помощью функции shapiro.test для определения обоснованности проведения дисперсионного анализа. Для визуализации данных использовали программу Excel и R (версии 4.3.1.).

Результаты

Определение влияния условий выращивания на жирнокислотный состав масла семян растений трех линий ЛГ34, ЛГ36 и ЛГ37 проводили в полевых условиях два года. Также в двух циклах гидропоники (ГП4 и ГП6) были выращены растения тех же линий. При этом в ГП4 и полевых условиях 2024 г. выращивали растения из потомства одного растения I_7, урожая 2023 г. Растения в ГП6 выращивали из семян растения I_8, которое было отобрано для изучения в 2024 г.

После определения состава жирных кислот в отдельных семенах было установлено, что значения стеариновой и олеиновой кислот достоверно различались в семенах растений, выращенных в полевых условиях и в камере гидропоники (табл. 2, рис. 3). Кроме того, для линии

Таблица 2. Содержание основных жирных кислот (%) в масле семян линий ЛГ34, ЛГ36 и ЛГ37 при выращивании в полевых и гидропонных (ГП) условиях

Table 2. Essential fatty acid content (%) in the seed oil of lines LG34, LG36 and LG37 grown in the field and in the hydroponic system (ГП)

Жирная кислота	Поле, 2023 г.			Поле, 2024 г.			ГП4			ГП6			$НСР_{05}$
	$\bar{x}$	min	max	$\bar{x}$	min	max	$\bar{x}$	min	max	$\bar{x}$	min	max	
ЛГ34													
C16:0	**6,4**	5,8	7,4	**5,8**	5,4	6,2	**5,1**	4,9	5,5	**4,9**	4,5	5,1	0,3
C18:0	**17,3**	16,0	18,4	**17,8**	14,8	19,1	**29,9**	26,1	34,4	**28,8**	27,1	31,1	1,4
C18:1	**65,2**	51,7	70,3	**69,1**	66,8	70,5	**52,3**	32,6	58,1	**53,2**	34,1	59,0	5,1
C18:2	**6,4**	2,4	18,3	**3,0**	2,1	4,2	**7,4**	2,4	32,1	**7,5**	3,0	25,2	4,9
ЛГ36													
C16:0	**6,0**	5,6	6,2	**5,8**	5,2	6,7	**5,6**	5,3	6,1	**3,7**	2,6	4,6	0,4
C18:0	**19,7**	18,0	21,1	**19,1**	16,1	21,0	**31,0**	29,1	33,6	**30,2**	26,6	34,4	1,5
C18:1	**66,2**	62,0	67,8	**68,1**	66,7	70,5	**51,5**	45,5	56,1	**50,5**	38,8	58,4	1,3
C18:2	**3,5**	2,1	9,0	**2,5**	1,9	4,0	**6,1**	3,5	10,9	**10,2**	4,1	18,3	2,3
ЛГ37													
C16:0	**6,9**	6,4	7,6	**6,4**	5,9	7,2	**6,3**	5,8	6,8	**5,9**	4,9	6,8	0,4
C18:0	**21,7**	16,3	25,7	**19,7**	16,5	22,4	**29,9**	24,1	32,2	**33,3**	28,5	37,4	2,4
C18:1	**60,6**	51,3	68,8	**65,7**	63,6	68,4	**49,0**	44,9	53,3	**43,1**	26,8	53,4	4,4
C18:2	**5,1**	2,7	15,6	**3,2**	2,4	5,7	**8,4**	4,4	16,9	**12,1**	5,5	24,8	3,6

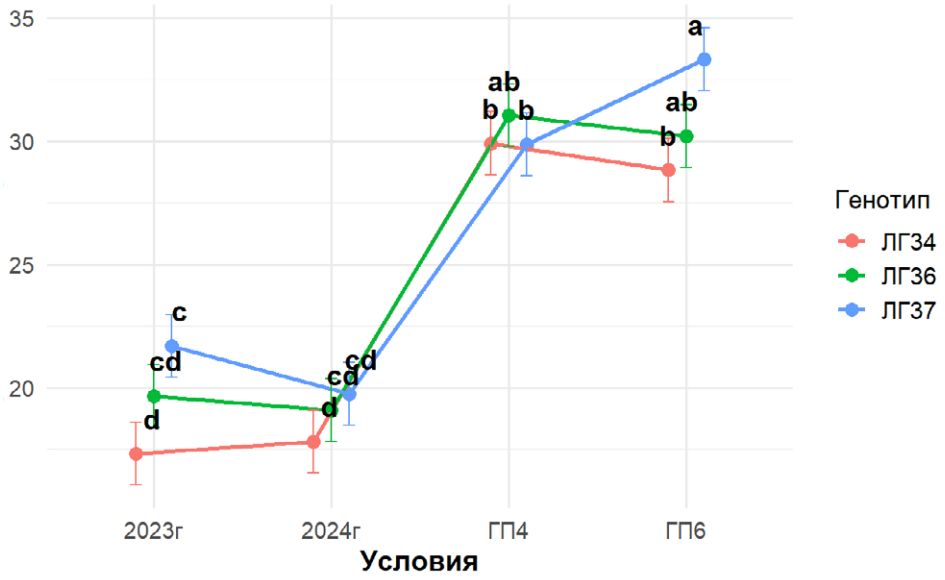


Рис. 3. Распределение генотипов по содержанию стеариновой кислоты при выращивании в полевых и гидропонных (ГП) условиях ($p < 0,05$)

Fig. 3. Distribution of genotypes according to their stearic acid content under field and hydroponic (ГП) conditions ($p < 0.05$)

ЛГ37 также наблюдали значимые отличия по содержанию стеариновой кислоты в двух поколениях в гидропонике.

Для всех трех линий изменение соотношения жирных кислот имело сходные направления (рис. 4). Так, в условиях гидропоники уровень стеариновой и линолевой кислоты увеличивался, тогда как содержание олеиновой кислоты снижалось. Уровень пальмитиновой кислоты был более стабильным.

Для линии ЛГ34 в семенах поколения I_8, выращенных в полевых и гидропонных условиях, разность значений по стеариновой кислоте составляла 12,1%, по олеиновой кислоте – 16,8%, а по пальмитиновой и линолевой кислотам была несущественной. В ГП4 у линии ЛГ36 увеличилось содержание стеариновой кислоты на 11,9%, линолевой – на 3,6%, а уровень олеиновой снизился на 16,6%. Сходные значения разности в жирнокислотном составе установлены и для линии ЛГ37: уровень стеариновой кислоты увеличивался в условиях гидропоники до 10,2%, олеиновая кислота снизилась на 16,7%, а линолевая кислота увеличивалась на 5,2%. Достоверное снижение содержания пальмитиновой кислоты на 0,7% установлено только для линии ЛГ34.

С использованием двухфакторного дисперсионного анализа было установлено, что влияние генотипа на соотношение основных жирных кислот достоверно для пальмитиновой, стеариновой и олеиновой кислот в полевом опыте (табл. 3), тогда как влияние условий года достоверно для пальмитиновой, олеиновой и линолевой жирных кислот.

Подобное сравнение силы влияния условий было проведено также для двух циклов гидропоники. Установ-

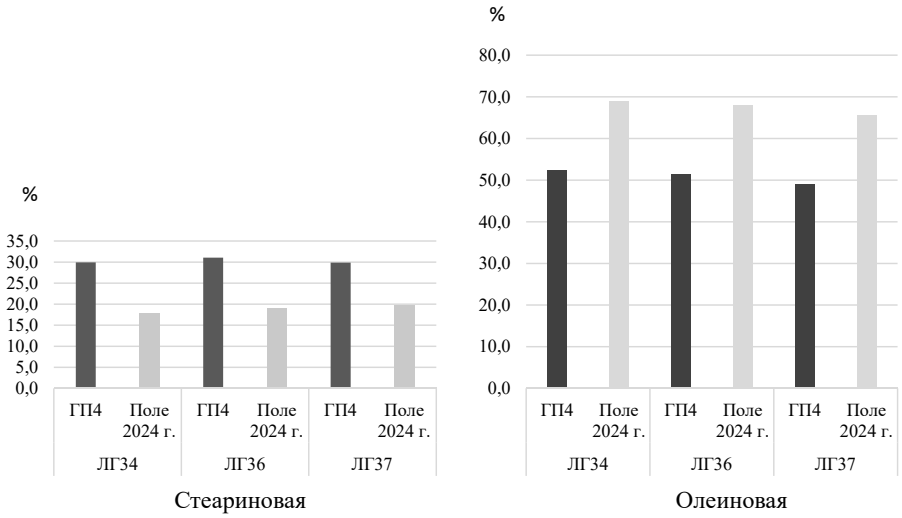


Рис. 4. Разность содержания по стеариновой и олеиновой жирным кислотам в семенах линий ЛГ34, ЛГ36 и ЛГ37 поколения I_8 при выращивании в полевых и гидропонных (ГП) условиях

Fig. 4. Difference in the content of stearic and oleic fatty acids in the seeds of lines LG34, LG36 and LG37 (generation I_8) grown under field and hydroponic (ГП) conditions

Таблица 3. Влияние условий года и генотипа на содержание основных жирных кислот в масле семян линий ЛГ34, ЛГ36 и ЛГ37 при выращивании в полевых и гидропонных (ГП) условиях

Table 3. The effect of the year's conditions and the genotype on the content of essential fatty acids in the seed oil of lines LG34, LG36 and LG37 grown under field and hydroponic (ГП) conditions

Источник вариации	C16:0		C18:0		C18:1		C18:2	
	p-value	*η, %*	*p-value*	*η, %*	*p-value*	*η, %*	*p-value*	*η, %*
В полевых условиях (2023 и 2024 г.)								
Год	< 0,01	**13,7**	0,16	–	< 0,01	19,2	< 0,01	**13,0**
Генотип	< 0,01	**37,9**	< 0,01	**33,3**	< 0,01	**20,8**	0,14	–
Взаимодействие	0,13	–	0,11	–	0,3	–	0,35	–
В условиях камеры гидропоники (ГП4 и ГП6)								
Условия	< 0,01	**21,3**	0,38	-	0,24	-	0,10	–
Генотип	< 0,01	**44,2**	0,01	**12,9**	< 0,01	**16,3**	0,31	–
Взаимодействие	< 0,01	**16,3**	< 0,01	**16,8**	0,26	-	0,52	–
В полевых условиях (2023 и 2024 г.) и в камере гидропоники (ГП4 и ГП6)								
Условия	< 0,01	**43,1**	< 0,01	**85,0**	< 0,01	**67,4**	< 0,01	**24,8**
Генотип	< 0,01	**27,6**	< 0,01	**3,2**	< 0,01	**5,7**	0,26	–
Взаимодействие	< 0,01	**11,5**	< 0,01	**1,9**	0,34	–	0,47	–

лено, что влияние экологических условий достоверно только для содержания пальмитиновой кислоты, тогда как доля генотипической изменчивости значима для пальмитиновой, стеариновой и олеиновой жирных кислот (см. табл. 3).

Однако при интегративном сравнении содержания основных жирных кислот при выращивании в течение двух лет в полевых условиях и в двух циклах гидропоники с использованием ANOVA выявили достоверное влияние экологического фактора на уровень всех изучаемых жирных кислот. Наиболее высокая доля влияния условий выявлена для стеариновой и олеиновой кислот (85 и 67% соответственно). Генотипические различия были выявлены для пальмитиновой, стеариновой и олеиновой жирных кислот, однако их вклад был значительно ниже (см. табл. 3).

Всю совокупность данных жирнокислотного состава семян трех линий, выращенных в различных условиях, представили на графике с использованием метода главных компонент (PCA), где обнаружили разделение всех значений на две группы (рис. 5). В первую вошли наблюдения по всем линиям, выращенным в полевых условиях, а во вторую – по всем линиям, выращенным в условиях камеры гидропоники. Следовательно, наиболее важным фактором, оказавшим влияние на состав жирных кислот изучаемых линий в данном исследовании, является фактор среды.

В результате оценки линейной корреляции установлены разнонаправленные взаимосвязи содержания основных жирных кислот с температурными показателями в полевых и гидропонных условиях (табл. 4). Наиболее сильную отрицательную корреляцию обнаружили для содержания стеариновой кислоты с максимальной и среднесуточной температур воздуха (r = –0,94 и r = –0,85), тогда как с понижением минимальной температуры наблюдали сильную положительную взаимосвязь (r = 0,86).

Противоположные связи установлены для признака содержания олеиновой кислоты, который положительно коррелирует с повышением среднесуточной и максимальной температуры (r = 0,87 и r = 0,94) и отрицательно связан с понижением минимальной температуры (–0,78). Для содержания линолевой кислоты установлена достоверная отрицательная корреляция с повышением среднесуточной и максимальной температурой (r = –0,84 и r = –0,79). Между содержанием пальмитиновой кислоты и температурой воздуха в период налива семян не обнаружили достоверной связи.

Обсуждение

Согласно климатической теории маслообразовательного процесса, разработанной С. Л. Ивановым, растения, произрастающие в более северных регионах, накапливают в семенах больше ненасыщенных жиров, что позволяет семенам сохранять жизнеспособность в период покоя и прорастания даже при низких температурах (Ivanov, 1961). Данная закономерность проявляется на межвидовом уровне. Для вида *Heliantus annuus* L. подобная зависимость отмечена и на внутривидовом уровне. Разными авторами была установлена сильная корреляция содержания олеиновой и линолевой жирных кислот в составе масла семян от температуры в период налива семян (Rochester, Silver, 1983; Seiler, 1983; Nagao, Yamazaki, 1984; Harris et al., 1989). Так, семена традиционных сортов и гибридов подсолнечника содержат более высокую долю линолевой кислоты (C18:2) при выращивании в холодных условиях, тогда как эти же сорта и гибриды в жарких условиях показывают сравнительно более высокую долю олеиновой кислоты (C18:1) в масле семян.

Мутационная изменчивость жирнокислотного состава не всегда согласуется с общими закономерностями. Установлено, что мутации высокоолеиновости *Ol* и высокостеариновости *es1*, *es2* и *es3* являются термозависимы-

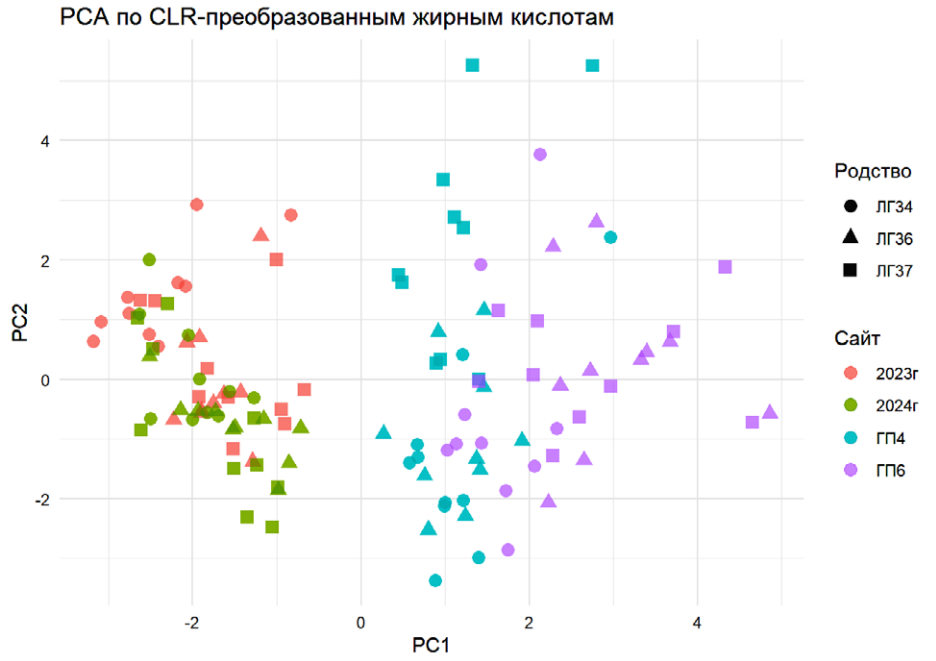


Рис. 5. PCA по жирным кислотам масла семян линий ЛГ34, ЛГ36 и ЛГ37 при выращивании в полевых и гидропонных (ГП) условиях

Fig. 5. PCA for fatty acids of the seed oil of lines LG34, LG36 and LG37 grown under field and hydroponic (ГП) conditions

Таблица 4. Линейная корреляция содержания основных жирных кислот и температуры воздуха

Table 4. Linear correlation between the content of essential fatty acids and air temperature

	C16:0	C18:0	C18:1	C18:2
Средняя минимальная температура воздуха, °C	–0,49	0,86*	–0,78*	0,57
Средняя максимальная температура воздуха, °C	0,52	–0,94*	0,94*	–0,84*
Среднесуточная температура воздуха, °C	0,38	–0,85*	0,87*	–0,79*

ми, однако направления изменения состава жирных кислот имеют разнонаправленный характер. С другой стороны, известна термостабильная мутация высокоолеиновости у линии подсолнечника NM1 (Alberio et al., 2015).

У *Ol* высокоолеиновых образцов подсолнечника в более холодных условиях наблюдается снижение доли C18:1, но размах вариации данного признака ниже в сравнении с традиционными по составу масла образцами. В данной работе также выявлена сильная положительная взаимосвязь содержания олеиновой кислоты с максимальной и среднесуточной температурами в период налива семян. При выращивании в прохладных условиях камеры гидропоники содержание олеиновой кислоты в среднем снижалось на 16,7% относительно результатов, полученных при выращивании растений в полевых опытах.

Закономерность изменения содержания стеариновой кислоты у высокоолеиновых линий ЛГ34, ЛГ36 и ЛГ37 имеет сходный характер с данными, описанными в исследовании испанских ученых для мутантных высокостеариновых линий CAS-4 и CAS-8 (Fernández-Moya et al., 2002). Однако интервал изменения доли стеариновой кислоты в нашем опыте с использованием камеры гидропоники был выше. Испанские линии и линии из коллекции ВНИИМК в прохладных условиях показывали более высокое содержание стеариновой кислоты – в среднем на 8 и 10–12% соответственно.

Более высокое накопление стеариновой кислоты у высокостеариновых линий ЛГ34, ЛГ36 и ЛГ37, вероятно, связано с тем, что активность стеароил-АЦП-десатуразы SAD при более низких температурах в период налива семян ниже, чем β-кетоацил-АПБ-синтетазы II (KAS II), поэтому часть стеароил-АПБ, продуцируемого KAS II, не десатурируется стеароил-АЦП-десатуразой (SAD) в олеиновую кислоту, а накапливается внутри пластиды и доступна для экспорта для использования в синтезе триацилглицеридов. При этом, несмотря на наличие мутации высокоолеиновости, десатурация олеиновой кислоты в линолевую проходит более эффективно в прохладных условиях.

Заключение

Содержание основных жирных кислот изменяется при выращивании в различных экологических условиях. Уровень пальмитиновой кислоты наиболее стабилен при изменении условий среды, тогда как содержание стеариновой и олеиновой жирных кислот показало максимальную изменчивость. В условиях камеры гидропоники у высокостеариновых высокоолеиновых линий ЛГ34, ЛГ36 и ЛГ37 содержание стеариновой кислоты увеличилось на 10,2–12,1%, а уровень олеиновой кислоты снизился на 16,6–16,8%, что, вероятно, связано с более низкой среднесуточной температурой в период созревания

семян. Влияние факторов окружающей среды обуславливает до 85% изменчивости стеариновой кислоты и около 67% вариации содержания олеиновой кислоты. Установлена сильная отрицательная корреляция содержания стеариновой кислоты со среднесуточной и максимальной дневной температурой, а также тесная положительная связь между минимальной ночной температурой и уровнем этого признака у высокостеариновых высокоолеиновых линий ЛГ34, ЛГ36 и ЛГ37.

References / Литература

Alberio C., Izquierdo N.G., Galella T., Zuil S., Reid R., Zambelli A. Et al. A new sunflower high oleic mutation confers stable oil grain fatty acid composition across environments. *European Journal of Agronomy*. 2016;73;25-33. DOI: 10.1016/j.eja.2015.10.003

Chebanova Yu.V., Zemtseva T.A., Demurin Ya.N. Sunflower parent breeding material with a high content of stearic acid. *Oil Crops*. 2025;1(201);21-28. [in Russian] (Чебанова Ю.В., Земцева Т.А., Демурин Я.Н. Исходный селекционный материал подсолнечника с высоким содержанием стеариновой кислоты. *Масличные культуры*. 2025;1(201);21-28). DOI: 10.25230/2412-608X-2025-1-201-21-28

Demurin Ya.N., Peretyagina T.M., Chebanova Yu.V., Konnov N.A., Shirokikh A.A., Sarkisyan E.S. et al. Hydroponic system for growing sunflower plants for breeding purposes. *Oil Crops*. 2024;4(200);3-12. [in Russian] (Демурин Я.Н., Перетягина Т.М., Чебанова Ю.В., Коннов Н.А., Широких А.А., Саркисян Е.С. и др. Гидропонная система выращивания растений подсолнечника для селекционных целей. *Масличные культуры*. 2024;4(200);3-12). DOI: 10.25230/2412-608X-2024-4-200-3-12

Fernández-Moya V., Martínez-Force E., Garcés R. Temperature effect on a high stearic acid sunflower mutant. *Phytochemistry*. 2002;59(1);33-37. DOI: 10.1016/s0031-9422(01)00406-x

GOST 31663-2012. Interstate standard. Vegetable oils and animal fats. Determination of methyl esters of fatty acids by gaz chromatography method. Moscow: Standartinform; 2019. [in Russian] (ГОСТ 31663-2012. Межгосударственный стандарт. Масла растительные и жиры животные. Определение методом газовой хроматографии массовой доли метиловых эфиров жирных кислот. Москва: Стандартинформ; 2019). URL: https://docs.cntd.ru/document/1200104486 [дата обращения: 30.11.2024].

GOST 31665-2012. Interstate standard. Vegetable oils and animal fats. Preparation of methyl esters of fatty acids. Moscow: Standartinform; 2019. [in Russian] (ГОСТ 31665-2012. Межгосударственный стандарт. Масла растительные и жиры животные. Получение метиловых эфиров жирных кислот. Москва: Стандартинформ; 2019). URL: https://docs.cntd.ru/document/1200104357 [дата обращения: 30.11.2024].

Guo S., Zhang Y., Shao Y., Zhao L., Zuo Y., Li S. et al. Transcriptome analysis reveals the potential molecular mechanism involved in fatty acids biosynthesis of Sunflower. *Research Square*. [preprint] 2024. DOI: 10.21203/rs.3.rs-4974760/v1

Harris H.C., McWilliam J.R., Mason W.K. Influence of temperature on oil content and composition of sunflower seed. *Australian Journal of Agricultural Research*. 1978;29(6);1203-1212. DOI: 10.1071/AR9781203

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

Ivanov P., Petakov D., Nikolova V., Pentchev E. Sunflower breeding for high palmitic acid content in the oil. In: *Proceedings of the 12th International Sunflower Conference, Novi Sad, Yugoslavia*. Paris: International Sunflower Association; 1988. p.463-465. Available from: https://www.isasunflower.org/fileadmin/documents/aProceedings/12thISC1988/Breeding/T1988BRE54_002.pdf [accessed Nov. 30, 2024].

Ivanov S.L. The climatic theory of organic matter formation (Klimaticheskaya teoriya obrazovaniya organicheskikh veshchestv). Moscow: USSR Academy of Sciences; 1961. [in Russian] (Иванов С.Л. Климатическая теория образования органических веществ. Москва: АН СССР; 1961).

Izquierdo N., Aguirrezábal L., Andrade F., Pereyra V. Night temperature affects fatty acid composition in sunflower oil depending on the hybrid and the phenological stage. *Field Crops Research*. 2002;77(2):115-126. DOI: 10.1016/S0378-4290(02)00060-6

Izquierdo N.G., Aguirrezabal L.A.N. Genetic variability in the response of fatty acid composition to minimum night temperature during grain filling in sunflower. *Field Crops Research*. 2008;106(2);116-125. DOI: 10.1016/j.fcr.2007.10.016

Lajara J.R., Diaz U., Quidiello R.D. Definitive influence of location and climatic conditions on the fatty acid composition of sunflower seed oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 1990;67(10);618-623. DOI: 10.1007/BF02540410

Mancha M., Osorio J., Garcés R., Ruso J., Muñoz J., Fernandez-Martinez J.M. New sunflower mutants with altered seed fatty acid composition. *Progress in Lipid Research*. 1994;33(1-2);147-154. DOI:10.1016/0163-7827(94)90017-5

Martínez-Force E., Álvarez-Ortega R., Cantisán S., Garcés R. Fatty acid composition in developing high saturated sunflower (*Helianthus annuus*) seeds: maturation changes and temperature effect. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1998;46(9);3577-3582. DOI: 10.1021/jf980276e

Nagao A., Yamazaki M. Effect of temperature during maturation on fatty acid composition of sunflower seed. *Agricultural and Biological Chemistry*. 1984;48(2);553-555. DOI: 10.1080/00021369.1984.10866182

Osorio J., Fernández-Martínez J.M., Mancha M., Garcés R. Mutant sunflowers with high concentration of saturated fatty acids in the oil. *Crop Science*. 1995;35(3);739-742. DOI: 10.2135/cropsci1995.0011183x003500030016x

Rauf S. Breeding strategies for sunflower (*Helianthus annuus* L.) genetic improvement. In: J. Al-Khayri, S. Jain, D. Johnson (eds). In: *Advances in Plant Breeding Strategies: Industrial and Food Crops*. Cham: Springer; 2019. p.637-673. DOI: 10.1007/978-3-030-23265-8_16

Rochester C.P., Silver J.G. Unsaturated fatty acid synthesis in sunflower (*Helianthus annuus* L.) seeds in response to night temperature. *Plant Cell Reports*. 1983;2(5);229-231. DOI: 10.1007/BF00269147

Seiler G.J. Effect of hybrid, flowering date and environment on oil content and oil quality of wild sunflower seed. *Crop Science*. 1983;23;1063-1068.

Soldatov K.I., Voskoboinik L.K., Kharchenko L.N. High-oleic sunflower variety Pervenets. *Oil Crops*. 1976;(3):3-7. [in Russian] (Солдатов К.И. Воскобойник Л.К., Харченко Л.Н. Высокоолеиновый сорт подсолнечника Первенец. *Масличные культуры*. 1976;(3):3-7).

Turhan H., Citak N., Pehlivanoglu H., Mengul Z. Effects of ecological and topographic conditions on oil content and fatty acid composition in sunflower. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2010;16(5);553-558.

USDA-IPAD. Sunflowerseed Explorer: [website]. Available from: https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=2224000 [accessed Apr. 10, 2025].

Информация об авторах

Юлия Владимировна Чебанова, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В.С. Пустовойта, 350038 Россия, Краснодар, ул. им. Филатова, 17, aqvablue@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7421-4800

Яков Николаевич Демурин, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В.С. Пустовойта, 350038 Россия, Краснодар, ул. им. Филатова, 17, genetic@vniimk.ru, https://orcid.org/0000-0003-3903-020X

Илья Владимирович Киров, доктор биологических наук, заведующий лабораторией, Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии, 127550 Россия, Москва, Тимирязевская, 42, kirovez@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-3885-3837

Information about the authors

Yulia V. Chebanova, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, V.S. Pustovoit All-Russia Research Institute of Oil Crops, 17 Filatova St., Krasnodar 350038, Russia, aqvablue@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7421-4800

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

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

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 19.09.2025; одобрена после рецензирования 15.11.2025; принята к публикации 10.02.2026.
The article was submitted on 19.09.2025; approved after reviewing on 15.11.2025; accepted for publication on 10.02.2026.

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ СЕЛЕКЦИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Научная статья
УДК 633.112.1:575
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o12

CC BY

Выявление аллельных вариантов гена *ZDS* у сортов и перспективных линий яровой твердой пшеницы (*Triticum durum* Desf.) саратовской селекции

С. Н. Гапонов[1], Г. И. Шутарева[1], Н. М. Цетва[1], И. С. Цетва[1], И. В. Милованов[1], Е. С. Жиганова[1], Н. С. Соловова[1], Н. А. Бурмистров[1], О. В. Ткаченко[2], Е. Е. Костина[2], И. В. Борисов[3]

[1] Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, Саратов, Россия

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

[3] Саратовский научный центр Российской академии наук, Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов, Саратов, Россия

Автор, ответственный за переписку: Галина Ивановна Шутарева, miss.shutik2010@yandex.ru

Актуальность. Для твердой пшеницы селекция на содержание каротиноидов в зерне и в конечном продукте (макаронных и крупяных изделиях) является одним из важнейших направлений. Каротиноиды, содержащиеся в зерне, положительно влияют на здоровье человека. Применение MAS-технологии в современной селекции позволяет проводить генотипирование большого числа образцов и дает возможность на практике ученому-селекционеру точнее оценивать имеющийся исходный материал.
Материалы и методы. Объектом исследования послужили сорта и линии яровой твердой пшеницы селекции ФАНЦ Юго-Востока. Для оценки аллельного состояния гена *z-каротиндесатуразы* (*ZDS*), участвующего в синтезе каротиноидов, влияющего на индекс желтизны (YI) и содержание каротиноидных пигментов (YPC), применяли метод KASP ZDS-A1_SNP-маркера.
Результаты. Установлено, что все образцы коллекции яровой твердой пшеницы саратовской селекции несут аллель *Zds-A1b* с положительным влиянием на содержание каротиноидов в зерне (YPC) и индекс желтизны (YI).
Заключение. Использование молекулярного маркера для определения аллельного состояния гена *ZDS*, влияющего на синтез каротиноидных пигментов, позволяет определить ценные и необходимые в селекции признаки качества селекционного материала и применять эти данные в создании востребованных в производстве сортов.

Ключевые слова: яровая твердая пшеница (*Triticum durum* Desf.), молекулярный маркер системы KASP ZDS-A1_SNP, каротиноиды, содержание желтого пигмента (YPC), индекс желтизны (YI)

Благодарности: работа выполнена по заданию № FNWF-2022-0003 «Создание и совершенствование системы видов и сортов (гибридов) сельскохозяйственных культур, адаптивных к абиострессорам и устойчивых к основным патогенам, сочетающих высокую потенциальную продуктивность с качеством урожая с целью снижения экономических рисков в растениеводстве и повышения биоразнообразия в регионе».

Для цитирования: Гапонов С.Н., Шутарева Г.И., Цетва Н.М., Цетва И.С., Милованов И.В., Жиганова Е.С., Соловова Н.С., Бурмистров Н.А., Ткаченко О.В., Костина Е.Е., Борисов И.В. Выявление аллельных вариантов гена *ZDS* у сортов и перспективных линий яровой твердой пшеницы (*Triticum durum* Desf.) саратовской селекции. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(2):158-167. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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.

© Гапонов С.Н., Шутарева Г.И., Цетва Н.М., Цетва И.С., Милованов И.В., Жиганова Е.С., Соловова Н.С., Бурмистров Н.А., Ткаченко О.В., Костина Е.Е., Борисов И.В., 2026

DOMESTIC PLANT BREEDING AT THE PRESENT STAGE

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o12

Identification of allelic variants of the *ZDS* gene in cultivars and promising lines of spring durum wheat (*Triticum durum* Desf.) developed in Saratov

Sergey N. Gaponov[1], Galina I. Shutareva[1], Natalia M. Tsetva[1], Ivan S. Tsetva[1], Ivan V. Milovanov[1], Elena S. Zhiganova[1], Nina S. Solovova[1], Nikita A. Burmistrov[1], Oksana V. Tkachenko[2], Ekaterina E. Kostina[2], Igor V. Borisov[3]

[1] *Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, Saratov, Russia*

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

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

Corresponding author: Galina I. Shutareva, miss.shutik2010@yandex.ru

Background. Durum wheat breeding for higher carotenoid content in grain and end products (pasta or groats) is a critical area of focus. Grain carotenoids provide a beneficial effect on human health. This study examines the use of marker-assisted selection (MAS) technology in contemporary breeding practice to enable genotyping greater numbers of accessions and allow breeders to assess the available source material with more precision.
Materials and methods. Spring durum wheat cultivars and lines developed at the Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, Saratov, served as the research material. The KASP ZDS-A1_SNP marker was employed to evaluate the allelic state of the *z-carotene desaturase* (*ZDS*) gene, which plays a role in carotenoid synthesis and affects the yellowness index (YI) and yellow pigment content (YPC).
Results. The study revealed that all spring durum wheat accessions from Saratov possessed the *Zds-A1b* allele, with its positive effect on both YPC and YI.
Conclusion. Utilizing a molecular marker to assess the allelic state of the *ZDS* gene, a participant in carotenoid pigment synthesis, makes it possible to identify valuable and essential quality traits in breeding material. These findings are promising for the development of commercially demanded wheat cultivars.

Keywords: spring durum wheat (*Triticum durum* Desf.), KASP ZDS-A1_SNP molecular marker, carotenoids, yellow pigment content (YPC), yellowness index (YI)

Acknowledgments: the work was carried out under Task No. FNWF-2022-0003 “Establishment and improvement of a system of crop species and cultivars (hybrids) adaptable to abiotic stressors and resistant to major pathogens, combining high potential productivity with harvest quality, in order to reduce economic risks in crop production and expand regional biodiversity”.

For citation: Gaponov S.N., Shutareva G.I., Tsetva N.M., Tsetva I.S., Milovanov I.V., Zhiganova E.S., Solovova N.S., Burmistrov N.A., Tkachenko O.V., Kostina E.E., Borisov I.V. Identification of allelic variants of the *ZDS* gene in cultivars and promising lines of spring durum wheat (*Triticum durum* Desf.) developed in Saratov. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(2):158-167. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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

В современной селекции применение MAS-технологий позволяет проводить генотипирование большого числа образцов, что дает возможность на практике ученому селекционеру точнее оценивать имеющийся материал. KASP-маркеры – один из инструментов MAS-технологии. Огромное количество локусов количественных признаков (QTL), картированных для различных видов растений, позволило выявить множество молекулярно-генетических ассоциаций (Khlestkina, 2013; Hasan et al., 2021; Shvachko et al., 2024). Использование молекулярного маркера для определения аллельного состояния генов, влияющих на определенные ценные и необходимые в селекции признаки, очень важно в создании востребованного сорта.

Для твердой пшеницы селекция на содержание каротиноидов в зерне и в конечном продукте (макаронных и крупяных изделиях) является одним из важнейших направлений. Исследования в данной области выявили QTL, регулирующие состав и содержание каротиноидных пигментов, практически на всех хромосомах пшеницы (He X. et al., 2009; Pozniak et al., 2012; Colasuonno et al., 2019).

Согласно литературным данным, в биосинтезе желтых пигментов твердой пшеницы участвуют несколько генов, но идентифицирована часть из них. *Фитоенсинтаза* (*PSY*) (Pozniak et al., 2007; He X. et al., 2008; Dibari et al., 2012), *каротиндесатураза* (*PDS*) и *z-каротиндесатураза* (*ZDS*) (Cong et al., 2010**)**, *ликопин-ε-циклаза* (*LYCE*), *каротиноидная β-гидроксилаза* (*BCH*), *ликопен-β-циклаза* (*LYCB*) (Colasuonno et al., 2017) наиболее изучены.

Исходным веществом в сложной схеме биосинтеза каротиноидов служит изопентилпирофосфат. Накопление изопреноида (C-5) – основа для образования геранилгеранилпирофосфата (C-20), соединение двух молекул при участии фермента фитоенсинтазы образует фитоен (C-40). Далее происходит десатурация фитоена под воздействием фитоенсинтазы *(PSY*), *z*-каротиндесатуразы (*ZDS*), каротинизомеразы (*CRTISO*), в результате получается ликопин – исходное вещество для α-каротина/лютеина, главного каротиноида твердой пшеницы, и β-каротина/зеаксантина. Поэтому *z*-каротиндесатураза (*ZDS*) является важным ферментом биосинтеза каротиноидов, демонстрируя высокую связь с содержанием желтого пигмента (YPC) в зерне пшеницы. Роль гена *ZDS* в данном процессе – контролировать активность фермента z-каротиндесатуразы (*ZDS*) (Cazzonelli, Pogson, 2010; Cong et al., 2010; Ke et al., 2019).

Структура гена *TdZds-A* была определена на основе сборки референсного генома сорта твердой пшеницы ‘Svevo’ (*Triticum durum* Desf.; GCA_900231445.1; Maccaferri et al., 2019) путем выравнивания с кДНК последовательностью *TaZds* мягкой пшеницы (*T. aestivum* L.) (GenBank: HQ703016; Dong et al., 2012) с использованием инструментов EnsemblPlants (https://plants.ensembl.org) (рис. 1).

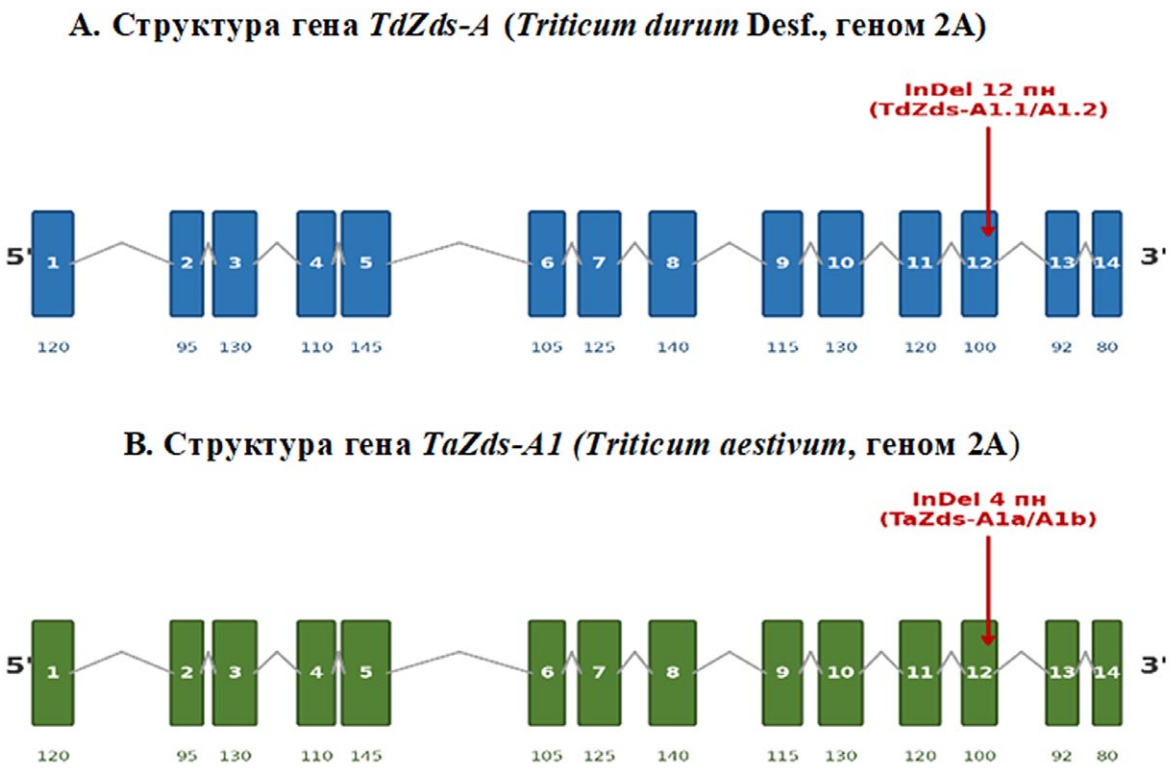


Рис. 1. Сравнительная структура гена *Zds-A* у твердой пшеницы (*Triticum durum* Desf.) и мягкой пшеницы (*T. aestivum* L.): A – *TdZds-A* (геном Svevo, хромосома 2A); B – *TaZds*-A1 (GenBank: HQ703016, хромосома 2A). Пронумерованные прямоугольники – экзоны, ломаные линии – интроны, стрелки указывают позиции InDel-полиморфизмов, лежащих в основе функциональных маркеров. Числа под экзонами – приблизительные размеры в пн

Fig. 1. Comparative structure of the *Zds-A* gene in durum wheat (*Triticum durum* Desf.) and bread wheat (*T. aestivum* L.): A – *TdZds-A* (Svevo genome, chromosome 2A); B – *TaZds-A1* (GenBank: HQ703016, chromosome 2A). Numbered rectangles represent exons, broken lines represent introns, and arrows indicate the positions of InDel polymorphisms underlying functional markers. The numbers under the exons are approximate sizes in bp

Ген *TdZds-A* расположен на длинном плече хромосомы 2A и содержит открытую рамку считывания (ORF) длиной 1707 пн, кодирующую полипептид из 568 аминокислотных остатков с предсказанной молекулярной массой 62,5 кДа. Ген состоит из 14 экзонов и 13 интронов, что полностью соответствует структуре гомеологичного гена *TaZds-A1*, ранее описанного у мягкой пшеницы (Dong et al., 2012).

Сравнительный анализ показал, что экзон-интронная организация гена высоко консервативна между мягкой и твердой пшеницей. Основные различия сосредоточены в некопирующих (интронных) областях, где обнаружены InDel-полиморфизмы, лежащие в основе функциональных маркеров. В частности, у мягкой пшеницы (*T. aestivum*) полиморфизм аллелей *TaZds-A1a* и *TaZds-A1b* основан на инсерционно-делеционном полиморфизме (InDel) размером 4 пн, что позволяет дифференцировать аллели с помощью кодоминантного маркера YP2A-1, дающего фрагменты 183 пн и 179 пн (Dong et al., 2012). У твердой пшеницы (*T. turgidum* var. *durum*) полиморфизм аллелей *TdZds-A1.1* и *TdZds-A1.2* основан на InDel размером 12 пн (Pasten et al., 2021). Аллель *TdZds-A1.2* ассоциирован с достоверно более высоким содержанием желтого пигмента (9,5 мг/кг) по сравнению с аллелем *TdZds-A1.1* (7,8 мг/кг).

Каротиноиды – не единственные в зерне желтые пигменты и составляют всего 33,2% от общего числа пигментов (Digesù et al., 2009: Blanco et al., 2011). Тем не менее именно каротиноиды являются наиболее исследованными. Этот показатель является одним из важнейших при создании сортов твердой пшеницы. Цвет муки, крупы и макаронных изделий в основном зависит от накопления каротиноидов в зерне (Mares, Campbell, 2001). Лютеин и его изомер стерео-зеаксантин функционируют как антиоксиданты. Каротиноиды, содержащиеся в зерне, положительно влияют на здоровье человека. Диетическое потребление и серологический уровень ксантофиллов (лютеин и виолоксантин) положительно коррелируют с полезным воздействием на людей, страдающих катарактой, возрастной пигментацией, сердечно-сосудистыми и неврологическими заболеваниями (Leenhardt et al., 2006; Patil et al., 2008).

Пищевые продукты из твердой пшеницы имеют низкий гликемический индекс (ГИ = 40 ед. по шкале в 100 ед. у сахарозы) и необходимы для людей, ведущих здоровый образ жизни. Низкое содержание сахара рекомендовано для людей с излишним весом и диабетом (Gaponov et al., 2024).

Цель исследования – изучить селекционный материал яровой твердой пшеницы на наличие аллеля *Zds-A1b* с положительным влиянием на содержание каротиноидов в зерне (YPC) и индекс желтизны (YI) для дальнейшего применения в создании сортов, востребованных в современном производстве пищевой промышленности.

Материал и методы

Для изучения взяли следующие сорта и перспективные линии ФАНЦ Юго-Востока: ‘Гордеиформе 432’, ‘Саратовская Золотистая’, ‘Валентина’, ‘Ник’, ‘Елизаветинская’, ‘Аннушка’, ‘Луч 25’, ‘Памяти Васильчука’, ‘Тамара’, ‘Гала’, ‘СТП Вероника’, D-2185, D-2178, D-2173, ‘Николаша’ (совместно с НЦЗ им. П.П. Лукьяненко).

Сорт яровой твердой пшеницы ‘Гордеиформе 432’, созданный академиком А. П. Шехурдиным и районированный в 1929 г., является стандартом оценки селекции в росте урожайности и качества этой культуры в условиях Саратова. С сорта ‘Саратовская Золотистая’, полученного в результате трансгрессии по содержанию каротиноидных пигментов, началось целое направление в селекции твердой пшеницы (Gaponov et al., 2018). Сорт ‘Валентина’ сочетает в себе устойчивость к листовой ржавчине и пыльной головне с высокой натурой и крупным зерном (масса 1000 зерен – 45–48 г), а при помоле дает самый высокий выход крупки. Сорт ‘Ник‘ высокоурожайный, засухоустойчивый, скороспелый, слабо восприимчив к вирусным заболеваниям, отличается высоким содержанием белка, клейковины и каротиноидных пигментов. Сорт ‘Елизаветинская’ скороспелый, от всходов до колошения в среднем 41 день. Востребован у производителей макаронно-крупяных изделий за высокие параметры качества клейковины, индекс желтизны крупки и содержание каротиноидов. Сорт ‘Аннушка’ имеет комплексную устойчивость к листостебельным болезням – ржавчинам и септориозу (Gaponov et al., 2025). Высокая продуктивность и качество клейковины делают сорт востребованным в регионах возделывания твердой пшеницы. Сорт ‘Николаша’, высокоурожайный и пластичный, имеет преимущество перед другими сортами при поздних сроках посева. Устойчив к бурой, желтой и стеблевой ржавчинам. Высокое качество клейковины используется для макаронных и крупяных изделий. Сорт ‘Луч 25’ скороспелый, урожайный, практически устойчив к «черному зародышу», слабо поражается вирусными инфекциями. Удачно совмещает высокую адаптивность с параметрами качества клейковины и макаронных изделий. Сорт ‘Памяти Васильчука’ высокопродуктивный, с высоким коэффициентом пластичности, отвечает всем современным параметрам качества твердой пшеницы: индекс глютена – 88 ед., индекс желтизны – 23,2%. Сорт ‘Тамара’ имеет преимущество в высоком содержании каротиноидных пигментов: индекс желтизны – 24,2%. Новые сорта ‘Гала’ и ‘СТП Вероника’ продолжают линейку современных сортов саратовской селекции, сочетающих в себе устойчивость к грибным и вирусным болезням с высокими показателями продуктивности, содержания белка, каротиноидов и качества клейковины.

Сорт ‘Neodur’ (Франция) использовался в качестве отрицательного контроля, несущего аллель *Zds-A1a*, негативно влияющий на содержание каротиноидов в зерне (Korobkova et al., 2023).

Содержание каротиноидных пигментов (YPC) оценивали методом экстрагирования сатурированным н-бутанолом с последующим фотоколориметрированием при длине волн 440–450 нм (Baslavskaya, Trubetskova, 1964; Pleshkov, 1968).

Индекс желтизны (YI) муки определяли с помощью спектрофотометра Spekol 10 (Vassiltchouk, 2001). Для количественного выражения насыщенности желтого цвета семолины или муки (в нашем случае – индекса желтизны) образцы исследовали по двум цветовым координатам – Y и Z, длины волн которых составляют 546,1 и 435,8 нм соответственно. Степень желтизны (b%) вычислялась по формуле, предложенной D. E. Walsh (1970) и усовершенствованной Н. С. Васильчуком (Vassiltchouk, 2001):

$$b\% = \frac{7 \cdot (Y - Z)}{\sqrt{Y}}, \text{ где:}$$

Y – % отражения при λ = 546,1 нм; Z – при λ = 435,8 нм.

Молекулярно-генетический анализ выявления аллельного состояния гена *Zds* (*ζ-каротиндесатуразы*) на основе KASP-маркера ZDS-A1_SNP проводился методом ПЦР в реальном времени на приборе TIANLONG (Китай) с использованием набора KASP 2X Mmix KBS-1050-102. Праймеры: F1 (FAM, аллель *Zds-A1b*); GAAGGTGACCA AGTTCATGCTCCATGCACTTGGACCT AATAG; F2 (HEX, *Zds-A1a*): GAAGGTCGGAGTCAACGGATTCCATGC ACTTGGACCTAA TAC; R: AAGCCGACGCGGATTTTGAA, предложенные в работе He Zhonghu et al. (2020), синтезированы «Евроген» (Россия, Москва). Амплификация проводилась при условиях, описанных в статье (Korobkova et al., 2023).

Результаты

Детекцию результата амплификации проводили с помощью каналов FAM и HEX (рис. 2).

Проанализированные сорта и линии яровой твердой пшеницы саратовской селекции с помощью KASP-маркера ZDS-A1_SNP для определения аллельного состояния гена *ZDS* показали следующие результаты, представленные в таблице.

Все 15 образцов яровой твердой пшеницы саратовской селекции несут аллель *Zds-A1b* с положительным влиянием на содержание каротиноидов в зерне (YPC) и индекс желтизны (YI). Подтверждено негативное состояние аллеля *Zds-A1a* у сорта 'Neodur' (Korobkova et al., 2023).

У сорта 'Neodur' показатели содержания каротиноидных пигментов (YPC) и индекс желтизны (YI) были на среднем уровне по сравнению с остальными сортами и линиями. По-видимому, за синтез желтых пигментов в данном случае отвечают другие каротинсинтезирующие гены.

Содержание YPC по всем 16 образцам варьировалось от 4,49 мг/кг у сорта 'Гордеиформе 432' до 8,14 мг/кг у перспективной линии D-2173, а индекс желтизны (YI) – от 18,3 до 25,7 у сорта 'СТП Вероника'.

Динамика роста по содержанию каротиноидных пигментов (YPC) в зерне сортов и линий, несущих аллель *Zds-A1b*, наглядно показана на рисунке 3. Данные для исследования взяты из анализа сортов и линий конкурсного сортоиспытания (ОКИ) за 2018–2025 гг. Начиная с сорта 'Саратовская Золотистая', все последующие превыша-

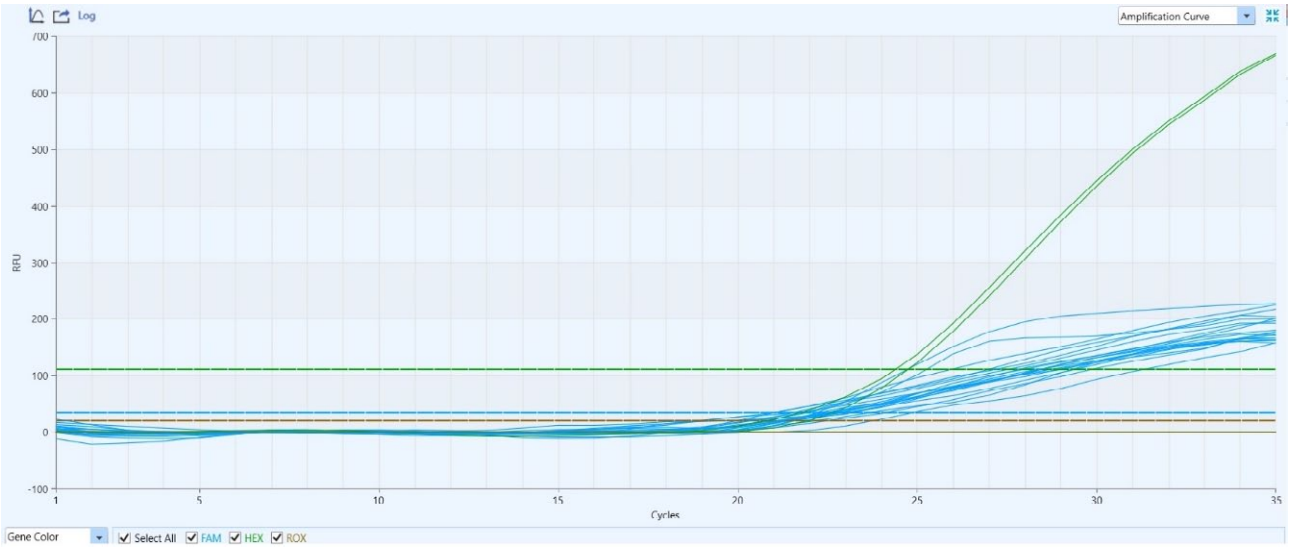


Рис. 2. Результаты амплификации KASP-маркера ZDS-A1_SNP для детекции гена *Zds* у коллекции образцов яровой твердой пшеницы: образцы с аллелем *Zds-A1b* (голубой цвет кривых), с аллелем *Zds-A1a* (зеленый цвет кривых)

Fig. 2. Results of the KASP marker ZDS-A1_SNP amplification for detecting the *Zds* gene in a collection of spring durum wheat cultivars: accessions with the *Zds-A1b* allele (blue curves), and with the *Zds-A1a* allele (green curves)

Таблица. Характеристика сортов и линий яровой твердой пшеницы

Table. Characterization of spring durum wheat cultivars and lines

№ по каталогу ВИР	Название сорта	Происхождение	Аллель гена *Zds*	Содержание каротиноидов YPC, мг/кг	Индекс желтизныYI
11372	'Гордеиформе 432'	Россия, Саратовская область	*Zds-A1b*	4,49	18,3
59832	'Саратовская Золотистая'	Россия, Саратовская область	*Zds-A1b*	6,66	23,1
62650	'Валентина'	Россия, Саратовская область	*Zds-A1b*	6,05	20,5
63773	'Ник'	Россия, Саратовская область	*Zds-A1b*	6,54	20,5

Таблица. **Окончание**

Table. **The end**

№ по каталогу ВИР	Название сорта	Происхождение	Аллель гена *Zds*	Содержание каротиноидов YPC, мг/кг	Индекс желтизныYI
63772	‘Елизаветинская’	Россия, Саратовская область	*Zds-A1b*	6,77	21,4
65947	‘Аннушка’	Россия, Саратовская область	*Zds-A1b*	6,29	21,3
64954	‘Николаша’	Россия, Краснодарский край	*Zds-A1b*	6,05	21,4
65948	‘Луч 25’	Россия, Саратовская область	*Zds-A1b*	5,60	21,4
66886	‘Памяти Васильчука’	Россия, Саратовская область	*Zds-A1b*	7,64	23,2
67452	‘Тамара’	Россия, Саратовская область	*Zds-A1b*	7,89	24,2
68325	‘Гала’	Россия, Саратовская область	*Zds-A1b*	7,64	24,0
–	‘СТП Вероника’*	Россия, Саратовская область	*Zds-A1b*	8,08	25,7
–	D-2185*	Россия, Саратовская область	*Zds-A1b*	7,40	22,3
–	D-2178*	Россия, Саратовская область	*Zds-A1b*	7,40	21,5
–	D-2173*	Россия, Саратовская область	*Zds-A1b*	8,14	22,5
63161	‘Neodur’	Франция	*Zds-A1a*	6,05	21,4

Примечание: * – материал лаборатории селекции яровой твердой пшеницы

Note: * – material from the Spring Durum Wheat Breeding Laboratory

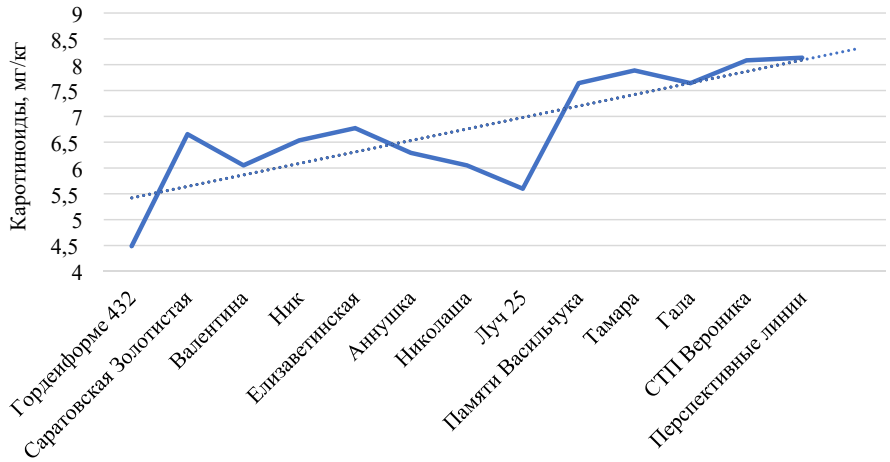


Рис. 3. **Тенденция на увеличение содержания каротиноидных пигментов у сортов и перспективных линий**

Fig. 3. **Tendency toward an increase in the content of carotenoid pigments in cultivars and promising lines**

ют сорт ‘Гордеиформе 432’, созданный в 1929 г., по содержанию каротиноидных пигментов (YPC) на величину от 1,11 мг/кг у сорта ‘Луч 25’ до 3,66 мг/кг у перспективной линии D-2173, что составляет от 23% до 81% прибавки.

Результаты амплификации образцов яровой твердой пшеницы (см. таблицу) и повышение содержания каротиноидных пигментов у сортов и перспективных линий саратовской селекции (см. рис. 3) сопряжены с наличием аллеля *Zds-A1b* (*TdZds-A1.2*) с положительно высоким средним YPC (6,84 мг/кг) по сравнению с аллелем *Zds-A1a* (*TdZds-A1.1*) у сорта ‘Neodur’ (YPC = 6,05 мг/кг).

Обсуждение

Селекционеры, проводившие исследования по маркированию на аллельное состояние гена *ZDS*, отмечают

в коллекциях сортов твердой пшеницы подавляющее большинство образцов с аллелем *Zds-A1b*. Так, скрининг 143 сортов озимой и яровой твердой пшеницы из коллекции Национального центра зерна (НЦЗ) им. П.П. Лукьяненко выявил только 4 сорта с аллелем *Zds-A1a*, все остальные 139 образцов были с аллелем *Zds-A1b* (Korobkova et al., 2023). Анализ 115 образцов яровой твердой пшеницы из коллекции Самарского научно-исследовательского института сельского хозяйства имени Н.М. Тулайкова показал аллельный вариант *Zds-A1b* у 112 изученных сортов и линий (https://rscf.ru/project/23-76-01079).

Нами установлено, что преобладающий в образцах аллель *Zds-A1b* не всегда ассоциирован с высоким, по сравнению с аллелем *Zds-A1a*, содержанием желтых пигментов. Среди образцов, имевших аллель *Zds-A1b*, были образцы с низким содержанием каротиноидов, как, например, сорт 'Луч 25' – 5,60 мг/кг в сравнении с сортом 'Neodur' – 6,05 мг/кг.

Следует отметить, что индекс желтизны (YI) напрямую зависит от содержания каротиноидов (YPC) в зерне. Корреляция между показателем желтизны, определяемым на приборе Spekol 10, и содержанием пигментов очень высокая – r = 0,90** (Vassiltchouk, 2001). Но бывает, что в процессе размола или замеса теста происходит «бурение», или накопление коричневого пигмента (N'Diaye et al., 2017). Объясняется это тем, что в процессе помола зерна происходит быстрое окисление каротиноидов, которое может быть связано с синтезом ферментов, отвечающих за деградацию пигментов, например *липоксигеназы*, детерминируемой геном *LOX* (Trifonova et al., 2025). По этой причине селекционеры работают над созданием сортов яровой твердой пшеницы с еще более высоким содержанием каротиноидных пигментов. Для примера, в наших исследованиях сорта с равнозначным количеством каротиноидов 'Саратовская Золотистая' (6,66 мг/кг) и 'Елизаветинская' (6,77 мг/кг) имели различия в индексе желтизны, который был выше у сорта 'Саратовская Золотистая' (23,1). Разница между сортом 'СТП Вероника' и линией D-2173 с высоким содержанием желтого пигмента – 8,08 мг/кг и 8,14 мг/кг, в величине индекса желтизны – 25,7 и 22,5 (см. таблицу).

Приведенные данные говорят о том, что в последние десятилетия селекционеры уделяли особое внимание выведению новых сортов твердой пшеницы с желтым цветом зерна, что влияет на их более высокую потребительскую и коммерческую ценность (Blanco et al., 2011; Gaponov et al., 2024).

Заключение

MAS-технологии в современной селекции – один из инструментов в практической работе ученого-селекционера. Используя данные генотипирования большого числа образцов по различным признакам, в том числе по содержанию каротиноидов, можно точнее оценить имеющийся у него исходный материал.

Данная работа по анализу сортов и перспективных линий яровой твердой пшеницы с помощью KASP-маркера ZDS-A1_SNP для определения аллельного состояния гена *ZDS* подтвердила качество саратовской пшеницы наличием аллеля *Zds-A1b*, положительно влияющего на содержание каротиноидных пигментов и индекс желтизны.

Рекомендуется учитывать данные результаты в программах скрещиваний и привлекать сорта саратовской селекции: 'Памяти Васильчука', 'Тамара', 'Гала', 'СТП Вероника' для создания высококаротиноидного селекционного материала.

References / Литература

Baslavskaya S.S., Trubetskova O.M. Practical training in plant physiology (Praktikum po fiziologii rasteniy). Moscow: Moscow State University; 1964. [in Russian] (Баславская С.С., Трубецкова О.М. Практикум по физиологии растений. Москва: МГУ; 1964).

Blanco A., Colasuonno P., Gadaleta A., Mangini G., Schiavulli A., Simeone R. et al. Quantitative trait loci for yellow pigment concentration and individual carotenoid compounds in durum wheat. *Journal of Cereal Science*. 2011;54(2):255-264. DOI: 10.1016/j.jcs.2011.07.002

Cazzonelli C.I., Pogson B.J. Source to sink: regulation of carotenoid biosynthesis in plants. *Trends in Plant Science*. 2010;15(5):266-274. DOI: 10.1016/j.tplants.2010.02.003

Colasuonno P., Lozito M.L., Marcotuli I., Nigro D., Giancaspro A., Mangini G. et al. The carotenoid biosynthetic and catabolic genes in wheat and their association with yellow pigments. *BMC Genomics*. 2017;18(1):122. DOI: 10.1186/s12864-016-3395-6

Colasuonno P., Marcotuli I., Blanco A., Maccaferri M., Condorelli G.E., Tuberosa R. et al. Carotenoid pigment content in durum wheat (*Triticum turgidum* L. var *durum*): an overview of quantitative trait loci and candidate genes. *Frontiers in Plant Science*. 2019;10:1347. DOI: 10.3389/fpls.2019.01347

Cong L., Wang C., Li Z., Chen L., Yang G., Wang Y. et al. cDNA cloning and expression analysis of wheat (*Triticum aestivum* L.) phytoene and ζ-carotene desaturase genes. *Molecular Biology Reports*. 2010;37(7):3351-3361. DOI: 10.1007/s11033-009-9922-7

Dibari B., Murat F., Chosson A., Gautier V., Poncet C., Lecomte P. et al. Deciphering the genomic structure, function and evolution of carotenogenesis related phytoene synthases in grasses. *BMC Genomics*. 2012;13(1):221. DOI: 10.1186/1471-2164-13-221

Digesù A.M., Platani C., Cattivelli L., Mangini G., Blanco A. Genetic variability in yellow pigment components in cultivated and wild tetraploid wheats. *Journal of Cereal Science*. 2009;50(2):210-218. DOI: 10.1016/j.jcs.2009.05.002

Dong C.H., Ma Z.Y., Xia X.C., Zhang L.P., He Z.H. Allelic variation at the TaZds-A1 locus on wheat chromosome 2A and development of a functional marker in common wheat. *Journal of Integrative Agriculture*. 2012;11(7):1067-1074. DOI: 10.1016/S2095-3119(12)60099-9

EnsemblPlants: [website]. Available from: https://plants.ensembl.org [accessed Jun. 23, 2025].

Gaponov S.N., Kon'kova E.A., Shutareva G.I., Zeleneva Yu.V. Characteristics of promising accessions of spring durum wheat breeding by the Federal Center of Agriculture Research of the South-East region for the leaf diseases resistance. *Russian Agricultural Sciences*. 2025;(4):3-8. [in Russian] (Гапонов С.Н., Конькова Э.А., Шутарева Г.И., Зеленева Ю.В. Характеристика перспективных сортов яровой твердой пшеницы селекции ФАНЦ Юго-Востока по устойчивости к листостебельным болезням. *Российская сельскохозяйственная наука*. 2025;(4):3-8). DOI: 10.7868/S3034582025040017

Gaponov S.N., Popova V.M., Shutareva G.I., Tsetva N.M., Parshikova T.M. Shchukin S.A. The variety "Saratovskaya zolotistaya" is 25. *Grain Economy of Russia*. 2018;(5):57-60. [in Russian] (Гапонов С.Н., Попова В.М., Шута-

рева Г.И., Цетва Н.М., Паршикова Т.М. Щукин С.А. 25 лет сорту Саратовская золотистая. *Зерновое хозяйство России*. 2018;(5):57-60). DOI: 10.31367/2079-8725-2018-59-5-57-60

Gaponov S.N., Shutareva G.I., Tsetva N.M., Tsetva I.S., Milovanov I.V., Burmistrov N.A. et al. Environmental adaptability of spring durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars developed in Saratov. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(1):184-190. [in Russian] (Гапонов С.Н., Шутарева Г.И., Цетва Н.М., Цетва И.С., Милованов И.В., Бурмистров Н.А. и др. Экологическая адаптивность сортов яровой твердой пшеницы (*Triticum durum* Desf.) саратовской селекции. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(1):184-190). DOI: /10.30901/2227-8834-2024-1-184-190

Hasan N., Choudhary S., Naaz N., Sharma N., Laskar R.A. Recent advancements in molecular marker-assisted selection and applications in plant breeding programmes. *Journal of Genetic Engineering Biotechnology*. 2021;19(1):128. DOI: 10.1186/s43141-021-00231-1

He X.Y., He Z.H., Ma W., Appels R., Xia X.C. Allelic variants of phytoene synthase 1 (*Psy1*) genes in Chinese and CIMMYT wheat cultivars and development of functional markers for flour colour. *Molecular Breeding*. 2009;23(4):553-563. DOI: 10.1007/s11032-009-9255-1

He X.Y., Zhang Y.L., He Z.H., Wu Y.P., Xiao Y.G., Ma C.X. et al. Characterization of *phytoene synthase 1* gene (*Psy1*) located on common wheat chromosome 7A and development of a functional marker. *Theoretical and Applied Genetics*. 2008;116(2):213-221. DOI: 10.1007/s00122-007-0660-8

He Z., Rasheed A., Xia X., Ma W. Molecular marker development and application for improving qualities in bread wheat. In: G. Igrejas, T.M. Ikeda, C. Guzmán. *Wheat Quality for Improving Processing and Human Health*. Cham: Springer Nature Switzerland; 2020. p.323-345. DOI: 10.1007/978-3-030-34163-3_14

Ke Q., Kang L., Kim H.S., Xie T., Liu C., Ji C.Y. et al. Down-regulation of lycopene ε-cyclase expression in transgenic sweetpotato plants increases the carotenoid content and tolerance to abiotic stress. *Plant Science*. 2019;281:52-60. DOI: 10.1016/j.plantsci.2019.01.002

Khlestkina E.K. Molecular markers in genetic studies and breeding. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2013;17(4/2):1044-1054. [in Russian] (Хлесткина Е.К. Молекулярные маркеры в генетических исследованиях и в селекции. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2013;17(4/2):1044-1054).

Korobkova V.A., Bespalova L.A., Yanovskiy A.S., Voropaeva A.D., Arkhipov A.V., Shirnin S.Yu. et al. Screening the collection of spring and winter durum wheat using KASP-marker specific to the *Zds* alleles. *Fodder Production*. 2023;(4):25-31. [in Russian] (Коробкова В.А., Беспалова Л.А., Яновский А.С., Воропаева А.Д., Архипов А.В., Ширнин С.Ю. и др. Скрининг коллекции яровой и озимой твердой пшеницы с помощью KASP-маркера на аллельное состояние гена *Zds*. *Кормопроизводство*. 2023;(4):25-31). DOI: 10.25685/krm.2023.4.2023.004

Leenhard F., Lyan B., Rock E., Boussard A., Potus J., Chanliaud E. et al. Genetic variability of carotenoid concentration, and lipoxygenase and peroxidase activities among cultivated wheat species and bread wheat varieties. *European Journal of Agronomy*. 2006;25(2):170-176. DOI: 10.1016/j.eja.2006.04.010

Maccaferri M., Harris N.S., Twardziok S.O., Pasam R.K., Gundlach H. et al. Durum wheat genome highlights past domestication signatures and future improvement targets. *Nature Genetics*. 2019;51(5):885-895. DOI: 10.1038/s41588-019-0381-3

Mares D.J., Campbell A.W. Mapping components of flour and noodle colour in Australian wheat. *Australian Journal of Agricultural Research*. 2001;52(12):1297-1309. DOI: 10.1071/AR01048

N'Diaye A., Haile J.K., Cory A.T., Clarke F.R., Clarke J.M., Knox R.E. et al. Correction: Single marker and haplotype-based association analysis of semolina and pasta colour in elite durum wheat breeding lines using a high-density consensus map. *PLoS One*. 2017;12(10):e0187178. DOI: 10.1371/journal.pone.0187178

Pasten M.C., Roncallo P.F., Camargo Acosta E.Y., Echenique C.V., Garbus I. Association of novel characterized sequence variations in the ζ-carotene desaturase (*Zds*) gene with yellow color and yellow pigment content in durum wheat cultivars. *Journal of Cereal Science*. 2021;99:103185. DOI: 10.1016/j.jcs.2021.103185

Patil R.M., Oak M.D., Tamhankar S.A., Sourdille P., Rao V.S. Mapping and validation of a major QTL for yellow pigment content on 7AL in durum wheat (*Triticum turgidum* L. ssp. *durum*). *Molecular Breeding*. 2008;21(4);485-496. DOI: 10.1007/s11032-007-9147-1

Pleshkov B.V. Practical guide to plant biochemistry (Praktikum po biokhimii rasteniy). Moscow: Kolos; 1968. [in Russian] (Плешков Б.В. Практикум по биохимии растений. Москва: Колос; 1968).

Pozniak C.J., Clarke J.M., Clarke F.R. Potential for detection of marker–trait associations in durum wheat using unbalanced, historical phenotypic datasets. *Molecular Breeding*. 2012;30(4):1537-1550. DOI: 10.1007/s11032-012-9737-4

Pozniak C.J, Knox R.E, Clarke F.R, Clarke J.M. Identification of QTL and association of a phytoene synthase gene with endosperm colour in durum wheat. *Theoretical and Applied Genetics*. 2007;114(3):525-537. DOI: 10.1007/s00122-006-0453-5

RSF. Russian Science Foundation. Project No. 23-76-01079. Title: Carotenoid metabolism genes and phytopathogen resistance genes in durum wheat: development and application of a marker system for targeted breeding (Geny metabolizma karotinoidov i geny ustoychivosti k fitopatogenam u tverdoy pshenitsy: razrabotka i primeneniye sistemy markerov dlya tselevoy selektsii). Project manager: Aya A. Trifonova, Cand. Sci. (Biology): [website]. [in Russian] (РНФ. Российский научной фонд. Номер проекта 23-76-01079. Название: Гены метаболизма каротиноидов и гены устойчивости к фитопатогенам у твердой пшеницы: разработка и применение системы маркеров для целевой селекции. Руководитель Трифонова Ая Арслановна, кандидат биологических наук: [сайт]). URL: https://rscf.ru/project/23-76-01079 [дата обращения 23.06.2025].

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 (Basel)*. 2024;13(8):1081. DOI: 10.3390/plants13081081

Trifonova A.A., Boris K.V., Dedova L.V., Malchikov P.N., Kudryavtsev A.M. Variability of carotenoid synthesis and degradation genes in Russian durum wheat cultivars. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2025;29(3):370-379 [in Russian] (Трифонова А.А., Борис К.В., Дедова Л.В., Мальчиков П.Н., Кудрявцев А.М. Разнообразие отечественных сортов твердой пшеницы по генам синтеза и деградации каротиноидов в зерне. *Вавиловский*

журнал генетики и селекции. 2025;29(3):370-379). DOI: 10.18699/vjgb-25-40

Vassiltchouk N.S. Spring durum wheat breeding (Selektsiya yarovoy tverdoy pshenitsy). Saratov: Novaya Gazeta; 2001. [in Russian] (Васильчук Н.С. Селекция яровой твердой пшеницы. Саратов: Новая газета; 2001).

Walsh D.E. Measurement of spaghetti color. *The Macaroni Journal*. 1970;52(4):20-22.

Zhang C., Dong C., He X., Zhang L., Xia X., He Z. Allelic variants at the TaZds-D1 locus on wheat chromosome 2DL and their association with yellow pigment content. *Crop Science*. 2011;51(4):1580-1590. DOI: 10.2135/cropsci2010.12.0689

Информация об авторах

Сергей Николаевич Гапонов, кандидат сельскохозяйственных наук, директор, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, raiser_saratov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8138-5955

Галина Ивановна Шутарева, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, miss.shutik2010@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-1159-2892

Наталия Михайловна Цетва, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, natacetva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9042-0831

Иван Сергеевич Цетва, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, tse2van@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-0539-9482

Иван Владимирович Милованов, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, Miliv13@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-4569-0300

Елена Сергеевна Жиганова, младший научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, alenash89@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1551-0084

Нина Сергеевна Соловова, младший научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, nsolovova@list.ru, https://orcid.org/0009-0004-3784-8547

Никита Андреевич Бурмистров, младший научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, kitbur_ka@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6094-1783

Оксана Викторовна Ткаченко, кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий кафедрой, Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, 410012 Россия, Саратов, пр. им. Петра Столыпина, 4, стр. 3, oktkachenko@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-8327-6763

Екатерина Евгеньевна Костина, научный сотрудник, Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, 410012 Россия, Саратов, пр. им. Петра Столыпина, 4, стр. 3, kostinaee@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0007-7448-9987

Игорь Викторович Борисов, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Саратовский научный центр Российской академии наук», Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов – обособленное структурное подразделение Саратовского научного центра РАН, 410049 Россия, Саратов, пр. Энтузиастов, 13, borigv@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5181-1653

Information about the authors

Sergey N. Gaponov, Cand. Sci. (Agriculture), Director, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, raiser_saratov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8138-5955

Galina I. Shutareva, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, miss.shutik2010@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-1159-2892

Natalia M. Tsetva, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, natacetva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9042-0831

Ivan S. Tsetva, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, tse2van@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-0539-9482

Ivan V. Milovanov, Cand. Sci. (Agriculture), Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, Miliv13@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-4569-0300

Elena S. Zhiganova, Associate Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, alenash89@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1551-0084

Nina S. Solovova, Associate Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, nsolovova@list.ru, https://orcid.org/0009-0004-3784-8547

Nikita A. Burmistrov, Associate Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, kitbur_ka@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6094-1783

Oksana V. Tkachenko, Cand. Sci. (Agriculture), Head of a Department, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, 4, bldg. 3 Petra Stolypina Ave., Saratov 410012, Russia, oktkachenko@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-8327-6763

Ekaterina E. Kostina, Researcher, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, 4, bldg. 3 Petra Stolypina Ave., Saratov 410012, Russia, kostinaee@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0007-7448-9987

Igor V. Borisov, Cand. Sci. (Biology), Researcher, Saratov Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms – subdivision of the Saratov Scientific Center of the RAS, 13 Entuziastov Ave., Saratov 410049, Russia, borigv@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5181-1653

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 21.10.2025; одобрена после рецензирования 18.03.2026; принята к публикации 10.04.2026.
The article was submitted on 21.10.2025; approved after reviewing on 18.03.2026; accepted for publication on 10.04.2026.

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ СЕЛЕКЦИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Научная статья
УДК 633.111
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o17

CC BY

Влияние условий отбора на результативность селекции яровой мягкой пшеницы

С. Б. Лепехов

Федеральный Алтайский научный центр агробиотехнологий, Барнаул, Россия

Автор, ответственный за переписку: Сергей Борисович Лепехов, sergei.lepehov@yandex.ru

Актуальность. Оценка генотипов в гибридной популяции зачастую искажается из-за нерегулируемых факторов, таких как остаточный гетерозис, конкуренция растений, почвенная неоднородность, погодные условия в год отбора. Если воздействие первых трех факторов в ранних поколениях гибридов невозможно устранить, то условия произрастания в некоторой степени могут быть управляемы путем создания провокационных фонов, испытания в разных географических пунктах или в разные годы. Наиболее доступный способ отбора растений в разнообразных условиях заключается в пересеве гибридных популяций на протяжении нескольких лет.
Материалы и методы. Двадцать четыре линии яровой мягкой пшеницы, полученные при индивидуальном отборе из восьми гибридных популяций в три разных года (2017, 2018, 2019), испытаны по урожайности и элементам продуктивности в лесостепи Алтайского Приобья (г. Барнаул) в 2024 и 2025 г.
Результаты. На изменчивость практически всех рассматриваемых признаков достоверно влияли факторы «родословная», «год отбора из гибридной популяции» и «год испытания линий поздних поколений». Наибольший вклад в изменчивость урожайности линий поздних поколений внес фактор «год испытания линий поздних поколений» (37,6%) и взаимодействие факторов «родословная» и «год отбора из гибридной популяции» (15,4%). Средняя урожайность была наибольшей у линий, отобранных в 2019 г. (415 г/м^2 против 408 г/м^2 и 383 г/м^2 в 2017 и 2018 г. соответственно), а наибольшее количество самых урожайных линий отобрано из популяций, посеянных в 2017 г. (4 штуки против 2 и 1 шт. в 2018 и 2019 г. соответственно).
Заключение. Условия, складывающиеся в год отбора из гибридных популяций, оказывают достоверное влияние на изменчивость практически всех признаков линий поздних поколений у яровой мягкой пшеницы. Индивидуальный отбор из разнообразных гибридных популяций в разные годы позволяет охватить широкую изменчивость, что повышает эффективность селекции.

Ключевые слова: гибридная популяция, взаимодействие «генотип × среда», урожайность, элементы структуры урожая

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания Федерального Алтайского научного центра агробиотехнологий № 0534-2024-0003 «Использование генетических и биотехнологических методов исследований в селекции растений».

Для цитирования: Лепехов С.Б. Влияние условий отбора на результативность селекции яровой мягкой пшеницы. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(2):168-177. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o17

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 его/ее месту работы.

© Лепехов С.Б., 2026

DOMESTIC PLANT BREEDING AT THE PRESENT STAGE

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o17

The effect of initial selection conditions on the breeding results in spring bread wheat

Sergey B. Lepekhov

Federal Altai Scientific Center of Agro-Biotechnologies, Barnaul, Russia

Corresponding author: Sergey. B. Lepekhov, sergei.lepehov@yandex.ru

Background. Genotype evaluation in a segregating population is often biased due to unregulated factors, such as heterozygosity, plant competition, soil differences, or weather conditions in the year of selection. The effect of the first three cannot be eliminated in early hybrid generations, but it is partially possible to regulate environmental factors through planting in different agroecological environments, geographic locations, and years. The most suitable way of plant selection under diverse conditions is to replant segregating populations continuously for several years.
Materials and methods. Twenty-four spring bread wheat lines, obtained by individual selection from eight segregating populations in three years (2017, 2018, and 2019), were evaluated for yield and yield components in the Ob River forest-steppe, Altai Territory (Barnaul), in 2024 and 2025.
Results. The greatest contribution to the yield variability in the advanced lines was made by the factor "year of testing advanced lines" (37.6%). The factor "year of selection from a segregating population" accounted for only 2% of the total yield variability, but the interaction of the factors "pedigree" and "year of selection from a segregating population" contributed to 15.4% of the yield variability. Even though the average yield was the highest in the lines selected in 2019 (415 g/m^2 vs. 408 g/m^2 and 383 g/m^2 in 2017 and 2018, respectively), the largest number of lines with high yield was selected from the populations planted in 2017 (4 pcs. vs. 2 and 1 pcs. in 2018 and 2019, respectively).
Conclusion. Natural conditions in the year of selection produce a significant impact on the variability of almost all characters in advanced lines of spring bread wheat. Individual selection from various segregating populations in different years makes it possible to employ wide variability, which would increase wheat breeding efficiency.

Keywords: segregating population, genotype × environment interaction, yield, yield structure components

Acknowledgments: this work was implemented within the framework of the state task delegated to the Federal Altai Scientific Center of Agro-Biotechnologies: No. 0534-2024-0003 "The use of genetics and biotechnological research methods in plant breeding".

For citation: Lepekhov S.B. The effect of initial selection conditions on the breeding results in spring bread wheat. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(2):168-177. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o17

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 his/her employers.

Введение

Эффективность селекции растений в значительной степени зависит от природных условий, в которых осуществляется отбор (Konovalov, Al-Sobakhi, 1983). Погодные условия в годы полевого испытания различны, а селекция не всегда ведется в той почвенно-климатической зоне, для которой предназначаются будущие сорта. Таким образом, взаимодействие «генотип × среда» всегда сопровождает работу селекционера. Взаимодействие «генотип × среда» заключается в смене рангов генотипов в разных средах либо в изменении величины признака генотипов без смены рангов в различных условиях. За последние три десятилетия было предложено множество статистических моделей и подходов для анализа взаимодействия «генотип × среда», а также для выявления высокоурожайных и наиболее стабильных генотипов (Pour-Aboughadareh et al., 2022). На практике уточнение целевой среды для будущих сортов заключается в испытании селекционного материала в различных условиях. Под условиями в данном случае подразумеваются географические точки, годы, провокационные фоны и агротехнические приемы или сочетание всего перечисленного. Как правило, такое экологическое испытание осуществляется на заключительных этапах селекционного процесса (Vaezi et al., 2019; Ahakpaz et al., 2021). Удачными примерами научного сотрудничества селекционеров в данном направлении в мире может служить программа челночной селекции CIMMYT (Rajaram et al., 2001), а в России – программы КАСИБ (Kuz'min et al., 2021; Filippova et al., 2023) и «Экада» (Syukov et al., 2019).

В пределах селекционных центров испытание линий поздних поколений может осуществляться при посеве по различным предшественникам (Musalitin et al., 2017), в различные сроки (Ahmad et al., 2022), при использовании орошения (Ud-Din et al., 1992; Javed et al., 2022). Информация о реакциях генотипов в конкретных экологических пунктах позволяет оптимизировать селекционный процесс или отдельные его этапы под создание сортов с требуемыми характеристиками для конкретных сред. Например, П. Н. Мальчиков (Malchikov, 2009) предложил использовать следующую схему для селекции твердой пшеницы: репродуцирование $F_1 – F_3$ и отбор элитных колосьев в Волгограде (паровой предшественник), испытания в селекционных и контрольном питомниках в Безенчуке (паровой предшественник), испытания предварительное и конкурсное в Безенчуке (паровой и зерновой предшественник) и Волгограде (паровой предшественник). Данное предложение вполне обосновано. Известно, что во второй половине XX века отбор в гибридных популяциях пшеницы, высеваемых в двух контрастных условиях Мексики (Сьюдад-Обрегон и Толука), с последующим испытанием селекционных линий в обширном наборе экологических пунктов, привел к созданию сортов с широкой адаптацией – 'Siete Cerros', 'Anza', 'Sonalika', 'Seri 82'. Данные сорта возделывались далеко за пределами Мексики (Braun et al., 1996).

Привлекательной выглядит идея создания фона для отбора растений на ранних стадиях селекционного процесса, где имеется максимальное генетическое разнообразие. Хотя генотип растения в таких условиях замаскирован разнообразными факторами и их сочетанием (Fischer, Rebetzke, 2018), условия произрастания растений могут быть в какой-то степени регулируемыми. По крайней мере, можно испытать растения в широком диапазоне сред (различные предшественники, сроки и нормы высева, годы, экологические пункты). Наиболее доступный способ в практической селекции заключается в пересеве гибридных популяций на протяжении нескольких лет. Однако прежде всего необходимо подтвердить наличие эффекта года отбора и взаимодействия «генотип × среда» при отборе из гибридных популяций.

Цель исследования: выявить влияние факторов «год отбора из гибридной популяции», «родословная», «год испытания линий поздних поколений» и их взаимодействий на изменчивость различных признаков селекционных линий яровой мягкой пшеницы.

Материалы и методы

Исследование проведено с 2014 по 2025 г. на опытном поле Федерального Алтайского научного центра агробиотехнологий (ФАНЦА) (53.418626 с. ш., 83.513076 в. д.), расположенном в Приобской лесостепи Алтайского края. Схема опыта по годам исследования:

2014 г. Гибридизация сортов и линий яровой мягкой пшеницы степного экологического типа.

2015 г. Размножение гибридов F_1.

2016 г. Посев восьми гибридных популяций F_2.

2017 г. Индивидуальный отбор из гибридных популяций F_3 (первая часть).

2018 г. Индивидуальный отбор из гибридных популяций F_3 (вторая часть).

2019 г. Индивидуальный отбор из гибридных популяций F_3 (третья часть).

2020 г. Посев всех потомств F_4, отобранных с 2017 по 2019 г., в селекционном питомнике первого года с последующим индивидуальным отбором.

2021 г. Посев потомств F_5 в селекционном питомнике первого года с последующим индивидуальным отбором.

2022 г. Посев потомств F_6 в селекционном питомнике первого года с последующим индивидуальным отбором.

2023 г. Размножение лучших семей F_7 в селекционном питомнике первого года.

2024–2025 гг. Финальное испытание линий поздних поколений F_8 и F_9.

Для гибридизации были выбраны генотипы коллекции лаборатории селекции мягкой пшеницы ФАНЦА, хорошо адаптированные к местным условиям и выделившиеся по хозяйственно-биологическим признакам в 2010–2012 гг.: 'Алтайская 105', 'Алтайская Жница', 'Лютесценс 453/2', 'Лютесценс 899' (Алтайский край); 'Тулеевская' (Кемеровская область); 'Лютесценс 827/01-42' 'Эритроспермум 78' (Омская область); 'Дуэт' (Челябинская область), 'Саратовская 71', 'Саратовская 72' (Саратовская область). Подбор пар для скрещивания осуществлен по эколого-географическому принципу таким образом, чтобы родительские компоненты дополняли друг друга по признакам продуктивности и устойчивости к лимитирующим факторам.

Гибридные популяции F_3 (1. 'Лютесценс 827/01-42' × 'Саратовская 71', 2. 'Тулеевская' × 'Саратовская 71', 3. 'Дуэт' × 'Алтайская 105', 4. 'Эритроспермум 78' × 'Алтайская 105', 5. 'Тулеевская' × 'Алтайская 105', 6. 'Лютесценс 899' × 'Саратовская 72', 7. 'Лютесценс 453/2' × 'Эритроспермум 78', 8. 'Лютесценс 453/2' × 'Алтайская Жница') сеяли на делянках площадью 10 м^2 по зерновому предшественнику (овес) во II декаде мая сеялкой ССФК-7. Норма высева – 500 зерен/м^2. В фазу полной спелости (III декада августа) проводили индивидуальный отбор 100 колосьев с каждой гибридной популяции. Критерии отбора были визуальными: размер колоса, количество колосков в нем, от-

сутствие болезней. Оценка и браковка зерна осуществлена в лаборатории по его крупности и выполненности, количеству зерен с колоса, отсутствию болезней. Данный метод работы с селекционным материалом традиционно используется в лаборатории селекции мягкой пшеницы ФАНЦА.

Посев в селекционном питомнике первого года осуществляли по паровому предшественнику во II декаде мая ручной сеялкой СР-1М. Длина рядка – 90 см, расстояние между рядками – 20 см. Работу с селекционным материалом вели методом педигри, то есть индивидуальным отбором лучших колосьев в лучших рядках, с последующим пересевом в селекционном питомнике первого года. В фазу полной спелости (III декада августа) проводили индивидуальный отбор 10 колосьев с каждого рядка. В конечном счете была отобрана и сохранена единственная линия от каждой гибридной популяции каждого года отбора (8 × 3 = 24 шт.).

Полученные линии испытывали на делянках площадью 0,9 м^2 в 3-кратной повторности. Норма высева – 500 зерен/м^2. Предшественник – пар. Посев во II декаде мая ручной сеялкой СР-1М. Уборку проводили в III декаде августа. Из снопа для последующего анализа брали 10 растений. Учитывали следующие показатели: продолжительность межфазного периода «всходы – колошение» (ПВК), высоту растения (ВР), коэффициент продуктивной кустистости (КПК), биомассу растения (БМ), количество колосков в главном колосе (ККК), озерненность главного колоса (ОГК), массу 1000 зерен (МТЗ), массу зерна главного колоса (МЗГК), массу зерна растения (МЗР), $К_{хоз}$ (доля зерна в общей биомассе растения), урожайность (Ур).

Расчет вклада факторов «родословная», «год отбора из гибридной популяции», «год испытания линий поздних поколений» и их сочетаний в изменчивость рассматриваемых признаков у линий F_8 и F_9 проведен методом трехфакторного дисперсионного анализа. Сопряженность признаков оценена с помощью парных коэффициентов корреляции для уровня значимости α = 5% (Lakin, 1980).

Почва опытного участка – чернозем выщелоченный, среднемощный малогумусный, среднесуглинистый (содержание гумуса – 3,8%; валового азота – 0,23%; подвижного фосфора и обменного калия по Чирикову – 200 мг/кг и 180 мг/кг соответственно; pHсол – 6,15).

Сумма осадков начала вегетации 2017 г. в целом совпадала со среднемноголетним значением, однако в июле выпало более 100% месячной нормы осадков (табл. 1). Избыточным, особенно в первой половине лета, количеством осадков характеризовался 2018 г. В 2017–2018 гг. на опытном поле возникла эпифитотия бурой и стеблевой ржавчин. В 2019, 2021 и 2022 г. отмечен дефицит осадков весной (типичные условия для Западной Сибири) и во второй половине лета. В 2020 г. засушливыми были май и июнь. В 2023 г. дефицит осадков в первой половине вегетации сменился интенсивными осадками в июле и августе, что вызвало прорастание зерна в колосе. Весь вегетационный период 2024 г. был переувлажненным. Осадки ливневого характера способствовали полеганию в III декаде июля и прорастанию зерна в колосе. В 2025 г. нетипично большое количество осадков выпало в июне и августе, что явилось причиной высоких урожаев зерна пшеницы.

Результаты

Между линиями поздних поколений, происходящих от различных гибридных популяций, в среднем отмечено существенное разнообразие по всем признакам, за исключением коэффициента продуктивной кустистости и массы зерна растения. (табл. 2). Линии, показавшие наибольшую среднюю урожайность, были отобраны из гибридных популяций ‘Тулеевская’ × ‘Саратовская 71’ (417 г/м^2), ‘Лютесценс 453/2’ × ‘Алтайская Жница’ (418 г/м^2) и ‘Лютесценс 899’ × ‘Саратовская 72’ (427 г/м^2), наименьшую урожайность – из гибридных популяций

Таблица 1. Среднемесячная температура воздуха и количество осадков за периоды вегетации растений 2017–2025 гг. (данные агрометеорологической станции г. Барнаула)

Table 1. Mean monthly air temperature and precipitation during the growing seasons from 2017 to 2025 (Barnaul Agrometeorological Station)

Месяц / Month	Среднемесячная температура воздуха, °C / Mean monthly air temperature, °C									
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	многолетняя / multiyear
Май / May	13,7	11,8	11,5	16,8	15,6	17,2	12,1	12,5	13,6	12,1
Июнь / June	19,8	17,7	17,0	17,5	16,9	18,2	19,7	20,3	20,9	17,7
Июль / July	18,8	19,8	20,0	20,0	20,1	18,8	21,4	21,6	19,8	19,9
Август / August	17,1	16,9	19,4	18,8	18,3	16,8	18,4	19,0	16,4	17,0
Месяц / Month	**Сумма осадков за месяц, мм / Monthly precipitation, mm**									
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	Многолетняя / multiyear
Май / May	49	97	13	31	19	5	10	81	23	42
Июнь / June	46	62	53	25	87	110	45	55	111	47
Июль / July	138	41	42	68	25	56	75	77	22	64
Август / August	56	11	36	53	28	16	80	79	164	49

Таблица 2. Средние значения признаков линий яровой мягкой пшеницы (2024 и 2025 г.) в зависимости от родословной, года отбора из гибридной популяции и года испытания линий поздних поколений

Table 2. Mean values of characters in spring bread wheat (2024 and 2025) depending on the pedigree, year of selection from a segregating population, and year of testing advanced lines

Фактор / Factor	ПВК / DH	ВР / PH	КПК / CT	БМ / PB	ККК / NSS	ОГК / NGS	МТЗ / TGW	МЗГК / GWS	МЗР / GWP	$К_{хоз}$ / HY	Ур / Y
«родословная» / "pedigree"											
1	43,7	101	2,11	5,29	15,6	29,1	36,2	1,09	2,01	37,9	411
2	43,6	106	1,88	4,79	16,8	31,1	33,7	1,07	1,77	37,3	417
3	46,3	104	2,17	5,31	16,0	28,4	34,5	1,01	1,90	35,8	403
4	48,8	111	2,02	5,37	16,0	29,7	33,1	1,01	1,80	33,2	360
5	49,1	108	2,11	6,13	17,1	29,4	34,5	1,07	1,98	32,0	377
6	43,7	103	2,08	5,46	15,1	28,3	38,4	1,14	2,05	37,9	427
7	42,6	106	1,98	5,02	16,2	27,9	36,4	1,05	1,84	36,7	404
8	42,2	100	1,85	4,92	16,5	28,1	37,5	1,07	1,78	36,5	418
$НСР_{05}$ / LSD_{05}	0,3	3	$F < F_t$	0,79	0,5	1,6	1,0	0,08	$F < F_t$	1,3	35
«год отбора из гибридной популяции» / "year of selection from a segregating population"											
2017	44,6	103	2,11	5,10	16,0	27,3	35,6	1,01	1,82	35,9	408
2018	44,8	106	1,97	4,98	15,9	29,3	34,0	1,02	1,79	35,9	383
2019	45,6	106	1,99	5,78	16,6	30,4	37,0	1,16	2,07	35,9	415
НСР 05 / LSD05	0,2	2	$F < F_t$	0,48	0,3	1,0	0,6	0,05	0,17	$F < F_t$	21
«год испытания линий поздних поколений» / "year of testing advanced lines"											
2024	45,6	103	1,82	4,21	17,0	29,3	31,2	0,95	1,50	35,6	348
2025	44,4	107	2,23	6,36	15,3	28,7	39,9	1,18	2,29	36,2	456
$НСР_{05}$ / LSD_{05}	0,1	1	0,09	0,32	0,2	$F < F_t$	0,4	0,03	0,11	$F < F_t$	14

Примечание: 1–8 – гибридные популяции; ПВК – продолжительность межфазного периода «всходы – колошение» (дней); ВР – высота растения (см); КПК – коэффициент продуктивной кустистости; БМ – биомасса растения (г); ККК – количество колосков в главном колосе (штук); ОГК – озерненность главного колоса (штук); МТЗ – масса 1000 зерен (г); МЗГК – масса зерна главного колоса (г); МЗР – масса зерна растения (г); $К_{хоз}$ – уборочный индекс (%); Ур – урожайность (г/м²); $F < F_t$ – фактический критерий Фишера меньше табличного

Note: 1–8 – segregating populations; DH – days to heading; PH – plant height (cm); CT – coefficient of tillering; PB – plant biomass (g); NSS – number of spikelets per spike; NGS – number of grains per spike; TGW – thousand-grain weight (g); GWS – grain weight per spike (g); GWP – grain weight per plant (g); HI – harvest index (%); Y – yield (g/m²); $F < F_t$ – experimental value of Fischer's criterion is less than its tabulated value

'Эритроспермум 78' × 'Алтайская 105' (360 г/м²) и 'Тулеевская' × 'Алтайская 105' (377 г/м²). Фактор «год отбора из гибридной популяции» вносил существенный вклад в изменчивость большинства признаков линий поздних поколений, за исключением коэффициента продуктивной кустистости и $К_{хоз}$. Данный фактор существенно повлиял на урожайность линий поздних поколений: в среднем наиболее урожайные линии были получены при отборе из гибридных популяций в 2017 и 2019 г. (408 и 415 г/м² соответственно), наименее урожайные – в 2018 г. (383 г/м²). Значения всех признаков, за исключением озерненности главного колоса и $К_{хоз}$, были достоверно выше в 2025 г., по сравнению с 2024 г.

В целом по опыту удалось отобрать семь высокоурожайных линий (432–466 г/м²): четыре в 2017 г., две в 2018 г. и одну в 2019 г. Четыре линии сформировали в среднем за 2024–2025 гг. низкую урожайность (299–358 г/м²). Одна из них была отобрана в 2017 г., три другие – в 2018 г. (табл. 3).

Рассматриваемые факторы вносили различный вклад в изменчивость признаков растений (табл. 4). Фактор «родословная» оказал наибольшее влияние на изменчивость периода «всходы – колошение» (55,6%) и на $К_{хоз}$ (35,3%), фактор «год испытания линий поздних поколений» – на изменчивость коэффициента продуктивной кустистости (24,5%), биомассы растения (42,4%), количества колосков в колосе (33,5%), массы 1000 зерен (63,8%), массы зерна главного колоса и растения (32,1 и 44,1% соответственно) и урожайности (37,6%). Взаимодействие факторов «родословная» и «год отбора из гибридной популяции» внесло наибольшее влияние на изменчивость высоты растения (39,5%), озерненности главного колоса (27,2%). Фактор «год отбора из гибридной популяции» в малой степени, хотя и достоверно,

Таблица 3. Средняя урожайность линий яровой мягкой пшеницы (2024, 2025 г.), отобранных в разные годы из гибридных популяций

Table 3. Mean yield of spring bread wheat lines (2024 and 2025) selected from segregating populations in different years

Родословная / Pedigree	Год отбора из гибридной популяции / Year of selection from a segregating population		
	2017	2018	2019
1	401	447	386
2	391	445	416
3	449	331	429
4	389	314	377
5	299	380	451
6	466	387	427
7	432	358	424
8	440	406	408
$НСР_{05}$ / LSD_{05}	60		

Таблица 4. Влияние факторов на изменчивость признаков линий яровой мягкой пшеницы поздних поколений (% суммы квадратов отклонений)

Table 4. The effect of factors on the variation of characters in advanced lines of spring bread wheat (% sum of squares)

Фактор / Factor	ПВК / DH	ВР / PH	КПК / CT	БМ / PB	ККК / NSS	ОГК / NGS	МТЗ / TKW	МЗГК / GWS	МЗР / GWP	$К_{хоз}$ / HY	Ур / Y
A	55,6*	21,8*	6,9	5,5*	17,7*	7,6*	10,4*	3,8*	2,9	35,3*	5,8*
B	1,7*	4,7*	2,1	4,6*	3,9*	12,9*	5,1*	11,7*	4,5*	0,0	2,4*
C	2,7*	4,8*	24,5*	42,4*	33,5*	0,9	63,8*	32,1*	44,1*	0,6	37,6*
A×B	37,4*	39,5*	6,4	2,1	16,3*	27,2*	9,4*	8,5*	2,7	27,3*	15,4*
A×C	0,3*	1,9	2,9	3,6	2,6	6,9*	4,4*	10,7*	4,3	7,0*	5,9*
B×C	0,1	0,1	0,5	1,2	0,4	2,3*	0,1	1,0	0,9	0,2	1,8*
A×B×C	0,7*	4,7	10,0	5,6	5,9*	10,0*	1,9*	9,6*	7,6	6,5*	7,4*
E	1,5	22,4	46,8	34,9	19,8	32,2	4,9	22,5	32,9	22,9	23,8

Примечание: A – фактор «родословная»; B – фактор «год отбора из гибридной популяции»; C – фактор «год испытания линий поздних поколений»; E – случайные факторы (остаточная дисперсия); * – $F > F_{t;0,05}$; остальные символы: см. примечание к таблице 2

Note: A – factor “pedigree”; B – factor “year of selection from a segregating population”; C – factor “year of testing advanced lines”; E – error (residual); * – $F > F_{t;0.05}$; other symbols: see the note to Table 2

влиял на изменчивость всех признаков, за исключением коэффициента продуктивной кустистости и $К_{хоз}$. Взаимодействие факторов «год отбора из гибридной популяции» и «год испытания линий поздних поколений» в очень незначительной степени отразилось на варьировании признаков растений. Тройное взаимодействие факторов существенным образом повлияло на вариацию периода «всходы – колошение», элементов продуктивности главного колоса, $К_{хоз}$ и урожайности (0,7–10,0%). Низкое значение остаточной дисперсии (< 10%) наблюдалось лишь по периоду «всходы – колошение» и массе 1000 зерен. Для остальных признаков данное значение превышало 20%.

Корреляционный анализ выявил различные по величине и разнонаправленные взаимосвязи между признаками растений и урожайностью линий поздних поколений в 2024 и 2025 г. (табл. 5). В 2024 г. урожайность умеренно или заметно отрицательно коррелировала с продолжительностью периода «всходы – колошение» и коэффициентом продуктивной кустистости (r = –0,60, r = –0,44 соответственно) и заметно и в высокой степени положительно – с количеством колосков в колосе, массой 1000 зерен, массой зерна главного колоса и растения и $К_{хоз}$ (r = 0,47–0,82). В 2025 г. умеренная и заметная корреляционная взаимосвязь установлена между урожайностью и коэффициентом продуктивной кустистости,

Таблица 5. Коэффициенты корреляции Пирсона между признаками линий поздних поколений и урожайностью в 2024 и 2025 году

Table 5. Pearson's coefficients of correlations between characters in advanced lines and their yield in 2024 and 2025

ПВК / DH	ВР / PH	КПК / ST	БМ / PB	ККК / NSS	ОГК / NGS	МТЗ / TKW	МЗГК / GWS	МЗР / GWP	$К_{хоз}$ / HY	Ур / Y
2024 г.										
–0,60	–0,20	--0,44	0,03	0,49	0,18	0,82	0,77	0,47	0,69	–
2025 г.										
–0,15	0,01	0,58	0,23	0,09	0,00	0,34	0,22	0,47	0,50	–
между значениями одноименных признаков в 2024 и 2025 г. / between values of the same characters in 2024 and 2025										
0,98	0,82	0,07	0,10	0,62	0,43	0,62	0,06	–0,13	0,67	0,23

Примечание: критическое значение коэффициента корреляции = 0,44 (p = 0,05); остальные символы: см. примечание к таблице 2

Note: critical value for r = 0.44 (p = 0.05); other symbols: see the note to Table 2

массой зерна растения, $К_{хоз}$ (r = 0,47–0,58). Весьма высокая и высокая корреляционная взаимосвязь между значениями признаков в 2024 и 2025 г. выявлена для продолжительности периода «всходы – колошение» (r = 0,98), высоты растений (r = 0,82), умеренная и заметная – для количества колосков в главном колосе, озерненности главного колоса, массы 1000 зерен и $К_{хоз}$ (r = 0,43–0,67).

Обсуждение результатов

Нет ничего удивительного в том, что фактор «родословная» существенным образом повлиял на изменчивость практически всех признаков линий поздних поколений, включая урожайность. Гибридизация – это основной способ создания исходного генетического разнообразия в селекции растений. Генетическое происхождение гибридной популяции в данном эксперименте оказало основополагающее влияние на изменчивость продолжительности периода «всходы – колошение», высоту растения и $К_{хоз}$. Данные признаки, как правило, демонстрируют высокую наследуемость, что предоставляет хорошую возможность для улучшения их посредством селекции (Ahmad, Gupta, 2023). Вклад фактора «родословная» в изменчивость урожайности составил всего 5,8%. В аналогичных исследованиях вклад генотипа в изменчивость урожайности составляет 4–12% (Demina, 2022; Fedosenko, Sidorov, 2024). Коэффициент продуктивной кустистости и масса зерна растения очень трудно поддаются селекционному улучшению из-за значительного влияния случайных факторов и условий года испытания, что было подтверждено и в нашем эксперименте.

Не является необычным и значительный вклад фактора «год испытания линий поздних поколений» в изменчивость большинства признаков, включая урожайность. Оба года испытания линий поздних поколений были переувлажненными, но в 2025 г. отсутствовал какой-либо серьезный, лимитирующий урожайность фактор. Летний максимум осадков пришелся на июнь, что отразилось на количестве дополнительных побегов и биомассе растений. Главным лимитирующим фактором 2024 г. явилось полегание селекционных линий спустя всего 2–3 недели после колошения вследствие июльских ливней, сопровождавшихся сильным ветром. Обычно условия года испытания составляют более половины изменчивости урожайности (Zenkina, Aseeva, 2024). В связи с этим испытание генотипов в широком наборе сред на финальных стадиях селекции очень важно (Ahakpaz et al., 2021; Ahmad et al., 2022).

Фактор «год отбора из гибридной популяции» хотя и в меньшей степени, но статистически значимо влиял на изменчивость урожайности и большинства других признаков растений. Возможная причина того, что средние величины признаков были наибольшими у селекционных линий, отобранных в гибридных популяциях в 2019 г., заключается в отборе (вряд ли осознанном) растений с более продолжительным периодом «всходы – колошение». В условиях поздневесенней засухи – типичного лимитирующего фактора в Западной Сибири – преимущество обычно имеют среднепоздние генотипы (Belan et al., 2021). Наименьшая средняя урожайность линий, отобранных в 2018 г., вероятно, также объясняется погодными условиями, которые по распределению осадков и среднемесячной температуре были ближе к климату Поволжья (достаточно увлажненная первая половина вегетации в сочетании с терминальной засухой). В таких условиях преимущество обычно получают среднеранние и среднеспелые генотипы (Albayrak et al., 2021).

Взаимодействие факторов «родословная» и «год отбора из гибридной популяции» вносило еще более весомый вклад в изменчивость признаков, чем фактор «год отбора из гибридной популяции», а по урожайности – больше, чем каждый из этих двух факторов по отдельности (15,4% против 2,4 и 5,8%). Таким образом, отбор растений в разнообразных гибридных популяциях, при отличающихся погодных условиях, не обязательно типичных для местности ведения селекции, позволяет охватить широкую изменчивость гибридного материала. Хотя наибольшей средней урожайностью характеризовались линии, отобранные из гибридной популяции в 2019 г., количество высокоурожайных линий, что важно для практической селекции, было больше при отборе из гибридных популяций в 2017 и 2018 г. В каждой гибридной популяции, за исключением 'Эритроспермум 78' × 'Алтайская 105', с 2017 по 2019 г. отобрано по одной линии с высокой урожайностью (более 432 г/м^2). При этом не выявлен какой-то явный фактор, приводящий к отбору высокоурожайных линий (год отбора или гибридная популяция). Вероятно, нами был осуществлен удачный подбор пар, так как для гибридизации исполь-

зовали генотипы, хорошо адаптированные к местным условиям.

Взаимодействие факторов «родословная» и «год испытания линий поздних поколений» ожидаемо оказало достоверное влияние на признаки, подверженные сильному влиянию окружающей среды: элементы продуктивности колоса, $К_{хоз}$, урожайность. В каждом эксперименте следует уделять внимание взаимодействию «генотип × среда» и анализировать его причины (Pour-Aboughadareh et al., 2022). В нашем эксперименте таковой причиной явилось полегание посевов в 2024 г., от которого в большей степени пострадали среднепоздние или неустойчивые к прорастанию зерна на корню генотипы.

Взаимодействие факторов «год отбора из гибридной популяции» и «год испытания линий поздних поколений» в очень незначительной мере влияло на изменчивость рассматриваемых признаков яровой мягкой пшеницы (не более 2,3%). То есть сам по себе фон отбора не приводил к массовому возникновению линий со специфической адаптацией. Такое явление если и имело место, то почти наверняка нивелировалось последующим отбором в 2020–2023 гг. на фоне типичных для Сибири погодных условий.

В трехфакторных опытах тройное взаимодействие факторов, как правило, невелико или статистически несущественно (Kadychegova et al., 2015; Maslova et al., 2021). Однако в нашем эксперименте вышеназванное взаимодействие факторов было статистически значимым, то есть влиянием факторов и их двойных взаимодействий не исчерпывается влияние на общую изменчивость признаков продуктивности и урожайности линий яровой мягкой пшеницы.

Величина урожайности в различных средах может определяться разными элементами его структуры (Mondal et al., 2020; Ahmad et al., 2022). В нашем эксперименте генотипические коэффициенты корреляции признаков с невысокой наследуемостью (коэффициент продуктивной кустистости, биомасса растения, озерненность главного колоса, продуктивность главного колоса и растения, урожайность) между 2024 и 2025 г. были статистически незначимы (r = –0,13–0,43), как и в аналогичных исследованиях (Ud-Din et al., 1992). Признаки растений в 2024 и 2025 г. были по-разному сопряжены с урожайностью. В 2024 г. зерновая продуктивность существенно зависела от того, сколько дней растения осуществляли нормальный налив зерна, пока не произошло полегание посевов. Именно поэтому урожайность была отрицательно и заметно сопряжена с продолжительностью периода «всходы – колошение» (r = –0,60). В 2025 г. урожайность в заметной степени определялась способностью генотипов к образованию дополнительных побегов кущения (r = 0,58).

Несмотря на то что продуктивность отдельных растений в гибридной популяции замаскирована остаточным гетерозисом, конкуренцией соседних растений, случайными причинами и погодными особенностями года (Ndondi, 1988; Zhu et al., 2022), последний фактор оказывает систематическое влияние на результативность отбора. Однако его действие нелинейно в различных гибридных популяциях. Специфические или типичные условия года не обязательно должны присутствовать для того, чтобы отобрать высокоурожайные генотипы. Известно, что засухоустойчивый сорт возможно создать в условиях без засухи (Richards, 1996). Фон для отбора можно создать относительно простыми способами: использованием различных предшественников, сроков сева, норм высева семян, удобрений, орошения, выбором композиций склона и т. д. Все это будет оказывать какое-то влияние на эффективность создания линий с заданными характеристиками, однако, как показал наш эксперимент, высокоурожайные линии поздних поколений отобраны практически независимо от условий отбора. Возможная причина может заключаться не столько в создании фона для отбора, сколько в объеме прорабатываемого материала. Из каждой гибридной популяции мы осуществляли отбор на протяжении трех лет, что не всегда возможно реализовать в практической селекции. К сожалению, эти два условия в нашем эксперименте невозможно было отделить. Вряд ли возможно определить селекционную ценность гибридной популяции исходя из данных одного года, пусть даже и типичного для местности. В конечном счете сортом становится, как правило, уникальный рекомбинант (Syukov et al., 2017), отбор которого трудно осуществить.

Заключение

Фактор «родословная» оказал наибольшее влияние на изменчивость продолжительности межфазного периода «всходы – колошение» (55,6%) и $К_{хоз}$ (35,3%), фактор «год испытания линий поздних поколений» – на изменчивость коэффициента продуктивной кустистости (24,5%), биомассы растения (42,4%), количества колосков в главном колосе (33,5%), массы 1000 зерен (63,8%), массы зерна главного колоса (32,1%), массы зерна растения (44,1%) и урожайности (37,6%), взаимодействие факторов «родословная» и «год отбора из гибридной популяции» – на изменчивость высоты растения (39,5%) и озерненности главного колоса (27,2%). Влияние фактора «год отбора из гибридной популяции» на изменчивость невелико (0,0–12,9%), но статистически значимо практически для всех вышеперечисленных признаков. Статистически значимое влияние взаимодействия факторов «родословная» и «год испытания линий поздних поколений» выявлено для продолжительности периода «всходы – колошение», озерненности главного колоса, массы 1000 зерен, массы зерна главного колоса, $К_{хоз}$, урожайности (0,3–10,7%). Взаимодействие факторов «год отбора из гибридной популяции» и «год испытания линий поздних поколений» практически не оказывало влияния на изменчивость рассматриваемых признаков (вклад менее 2,3%). Тройное взаимодействие факторов статистически значимо влияло на изменчивость периода «всходы – колошение», количества колосков в колосе, озерненности главного колоса, массы 1000 зерен, массы зерна главного колоса, $К_{хоз}$, урожайности (0,7–10,0%). Отбор из разнообразных гибридных популяций в разные годы позволяет охватить большую изменчивость, что повышает эффективность селекции яровой мягкой пшеницы.

References / Литература

Ahakpaz F., Abdi H., Neyestani E., Hesami A., Mohammadi B., Mahmoudi K.N. et al. Genotype-by-environment interaction analysis for grain yield of barley genotypes under dryland conditions and the role of monthly rainfall. *Agricultural Water Management*. 2021;245:106665. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106665

Ahmad A., Gupta R.K. Genetic variability, heritability and genetic advance for yield and yield associated traits in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Annals of Agricul-*

tural and Crop Sciences. 2023;8(1):1125. DOI: 10.26420/annagriccropsci.2023.1125

Ahmad Z., Khan N.U., Gul S., Iqbal A., Ali S., Ali N. et al. Wheat assessment for heat stress tolerance using stress selection indices under distinct planting regimes. *Pakistan Journal of Botany*. 2022;54(3):823-834. DOI: 10.30848/PJB2022-3(33)

Albayrak O., Bayhan M., Ozkan R., Akinci C., Yildirim M. Effect of drought on morphological and physiological development of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes at pre and post heading period. *Applied Ecology and Environmental Research*. 2021;19(6):4251-4263. DOI: 10.15666/aeer/1906_42514263

Belan I.A., Rosseeva L.P., Blokhina N.P., Grigoriev Y.P., Mukhina Y.V, Trubacheeva N.V. et al. Resource potential of soft spring wheat varieties for the conditions of Western Siberia and Omsk region (analytical review). *Agricultural Science Euro-North-East*. 2021;22(4):449-465. [in Russian] (Белан И.А., Россеева Л.П., Блохина Н.П., Григорьев Ю.П., Мухина Я.В., Трубачеева Н.В. и др. Ресурсный потенциал сортов пшеницы мягкой яровой для условий Западной Сибири и Омской области (аналитический обзор). *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2021;22(4):449-465). DOI: 10.30766/2072-9081.2021.22.4.449-465

Braun H.J., Rajaram S., van Ginkel M. CIMMYT's approach to breeding for wide adaptation. *Euphytica*. 1996;92(1):175-183. DOI: 10.1007/BF00022843

Demina I.F. Adaptabilities of spring wheat varieties and lines in terms of productivity and elements of its structure in forest-steppe conditions of the Middle Volga region. *International Agricultural Journal*. 2022;65(5):530-534. [in Russian] (Демина И.Ф. Адаптивность сортов и линий яровой пшеницы по урожайности и элементам ее структуры в условиях лесостепи среднего Поволжья. *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2022;65(5):530-534). DOI: 10.55186/25876740_2022_65_5_530

Fedosenko D.F., Sidorov A.V. Assessment of adaptability of spring soft wheat varieties of Krasnoyarsk breeding by grain productivity. *Vestnik of Omsk SAU*. 2024;2(54):64-70. [in Russian] (Федосенко Д.Ф., Сидоров А.В. Оценка адаптивности сортов яровой мягкой пшеницы красноярской селекции по зерновой продуктивности. *Вестник Омского ГАУ*. 2024;2(54):64-70).

Filippova E., Mal'ceva L., Bannikova N., Drobot I., Kataeva N. The environmental testing role as a decisive factor in evaluating new spring soft wheat variety Aist 45. *The Bulletin of KrasGAU*. 2023;(2):65-72. [in Russian] (Филиппова Е.А., Мальцева Л.Т., Банникова Н.Ю., Дробот И.А., Катаева Н.В. Роль экологического испытания как решающего фактора в оценке нового сорта яровой мягкой пшеницы Аист 45. *Вестник КрасГАУ*. 2023;(2):65-72). DOI: 10.36718/1819-4036-2023-2-65-72

Fischer R.A., Rebetzke G.J. Indirect selection for potential yield in early-generation, spaced plantings of wheat and other small-grain cereals: a review. *Crop and Pasture Science*. 2018;69(5):439-459. DOI: 10.1071/CP17409

Javed A., Ahmad N., Ahmed J., Hameed A., Ashraf M.A., Zafar A.S. et al. Grain yield, chlorophyll and protein contents of elite wheat genotypes under drought stress. *Journal of King Saud University – Science*. 2022;34(7):102279. DOI: 10.1016/j.jksus.2022.102279

Kadychegova A.N., Borodynya A.N., Kadychegova V.I., Kadychegov V.A. Forecrop effect on the yield of spring soft wheat varieties of different ripeness groups in the steppe zone of southern Central Siberia. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2015;2(124):5-10. [in Russian] (Кадычегова А.Н., Бородыня А.Н., Кадычегова В.И., Кадычегов В.А. Влияние предшественника на урожай сортов яровой мягкой пшеницы различных групп спелости в степной зоне юга Средней Сибири. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2015;2(124):5-10).

Konovalov Yu.B., Al-Sobakhi S.S. Prediction of efficiency in selection from crops of different density for spring bread wheat cultivars (Prognoz effektivnosti otbora iz posevov razlichnoy gustoty u sortov yarovoy myagkoy pshenitsy). *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 1983;(5):43-50. [in Russian] (Коновалов Ю.Б., Аль-Собахи С.С. Прогноз эффективности отбора из посевов различной густоты у сортов яровой мягкой пшеницы. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 1983;(5):43-50).

Kuz'min O.G., Chursin A.S., Krasnova Yu.S., Karakoz I.I., Shamanin V.P. Evaluation of the ecological plasticity of promising lines from the KASIB-20 nursery according to yield and grain quality. *Vestnik of Omsk SAU*. 2021;1(41):28-36. [in Russian] (Кузьмин О.Г., Чурсин А.С., Краснова Ю.С., Каракоз И.И., Шаманин В.П. Оценка экологической пластичности перспективных линий питомника КАСИБ-20 по урожайности и качеству зерна. *Вестник Омского ГАУ*. 2021;1(41):28-36). DOI: 10.48136/2222-0364_2021_1_28

Lakin G.F. Biometrics (Biometriya). Moscow: Vysshaya Shkola; 1980. [in Russian] (Лакин Г.Ф. Биометрия. Москва: Высшая школа; 1980).

Malchikov P.N. Set of habitats for selection of homeoadaptive varieties of summer durum wheat. *Agrarian Reporter of South-East*. 2009;2(2):32-35. [in Russian] (Мальчиков П.Н. Совокупность сред для отбора гомеоадаптивных сортов яровой твердой пшеницы. *Аграрный вестник Юго-Востока*. 2009;(2):32-35).

Maslova G.A., Astashov A.N., Zhuzhukin V.I., Bagdalova A.Z., Safronov A.A. Influence of the sowing method and the predecessor on the yield of new chickpea varieties. *The Agrarian Scientific Journal*. 2021;(11):31-35. [in Russian] (Маслова Г.А., Асташов А.Н., Жужукин В.И., Багдалова А.З., Сафронов А.А. Влияние способов посева и предшественников на урожайность новых сортов нута. *Аграрный научный журнал*. 2021;(11):31-35). DOI: 10.28983/asj.y2021i11pp31-35

Mondal S., Dutta S., Crespo-Herrera L., Huerta-Espino J., Braun H.J., Singh R.P. Fifty years of semi-dwarf spring wheat breeding at CIMMYT: Grain yield progress in optimum, drought and heat stress environments. *Field Crops Research*. 2020;250:107757. DOI: 10.1016/j.fcr.2020.107757

Musalitin G.M., Boradulina V.A., Kuzikeyev Zh.V., Deines N.V. Economic and biological characteristics of a new grain-fodder barley variety Aley. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2017;11(157):18-22. [in Russian] (Мусалитин Г.М., Борадулина В.А., Кузикеев Ж.В., Дейнес Н.В. Хозяйственно-биологические характеристики нового сорта ячменя зернофуражного использования Алей. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2017;11(157):18-22).

Ndondi R.V. Comparison of F_2 single plant grain yield and total dry matter as estimators of yield potential in wheat. In: M. van Ginkel, D.G. Tanner (eds). *Fifth Regional Wheat Workshop for Eastern, Central, and Southern Africa and the Indian Ocean (Antsirabe, Madagascar, October 5–10, 1987)*. Mexico: CIMMYT; 1988. p.74-78.

Pour-Aboughadareh A., Khalili M., Poczai P., Olivoto T. Stability indices to deciphering the genotype-by-environment interaction (GEI) effect: an applicable review for use in plant breeding programs. *Plants (Basel)*. 2022;11(3):414. DOI: 10.3390/plants11030414

Rajaram S., van Ginkel M. Mexico, 50 years of international wheat breeding. In: A.P. Bonjean, W.J. Angus (eds). *The World Wheat Book: A History of Wheat Breeding*. Paris: Lavoisier Publishing; 2001. p.579-608.

Richards R.A. Defining selection criteria to improve yield under drought. *Plant Growth Regulation*. 1996;20:57-166. DOI: 10.1007/BF00024012

Syukov V.V., Shabolkina E.N., Viyushkov A.A., Porotkin S.E., Gulaeva N.V. Spring soft wheat 'Tulaykovskaya nadezhda'. *Grain Economy of Russia*. 2017;4(52):14-16. [in Russian] (Сюков В.В. Шаболкина Е.Н., Вьюшков А.А., Поротькин С.Е., Гулаева Н.В. Яровая мягкая пшеница Тулайковская надежда. *Зерновое хозяйство России*. 2017;4(52):14-16).

Syukov V.V., Zakharov V.G., Malchikov P.N., Krivobochek V.G., Nikonov V.I., Vasilova N.Z., et al. Evaluation of the differentiation ability of ecological points in generated environmental vector program "Ekada". *The Agrarian Scientific Journal*. 2019;(4):32-37. [in Russian] (Сюков В.В., Захаров В.Г., Мальчиков П.Н., Кривобочек В.Г., Никонов В.И., Василова Н.З., Ганеев В.А. Оценка дифференцирующей способности экопунктов в сформированном экологическом векторе программы «Экада». *Аграрный научный журнал*. 2019;(4):32-37). DOI: 10.28983/asj.y2019i4pp32-37

Ud-Din N., Carver B.F., Clutter A.C. Genetic analysis and selection for wheat yield in drought-stressed and irrigated environments. *Euphytica*. 1992;62(2):89-96. DOI: 10.1007/BF00037933

Vaezi B., Pour-Aboughadareh A., Mohammadi R., Mehraban A., Hossein-Pour T., Koohkan E. et al. Integrating different stability models to investigate genotype × environment interactions and identify stable and high-yielding barley genotypes. *Euphytica*. 2019;215(4):63. DOI: 10.1007/s10681-019-2386-5

Zenkina K.V., Aseeva T.A. Formation of the yield spring soft wheat in the Middle Amur region conditions. *The Bulletin of KrasGAU*. 2024;12(213):19-25. [in Russian] (Зенкина К.В., Асеева Т.А. Формирование урожайности яровой мягкой пшеницы в условиях Среднего Приамурья. *Вестник КрасГАУ*. 2024;12(213):19-25). DOI: 10.36718/1819-4036-2024-12-19-25

Zhu Y.H., Weiner J., Jin Y., Yu M.X., Li F.M. Biomass allocation responses to root interactions in wheat cultivars support predictions of crop evolutionary ecology theory. *Frontiers in Plant Science*. 2022;13:858636. DOI: 10.3389/fpls.2022.858636

Информация об авторе

Сергей Борисович Лепехов, кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией, Федеральный Алтайский научный центр агробиотехнологий, 656910 Россия. Барнаул, Научный городок, 35, sergei.lepehov@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-1561-6345

Information about the author

Sergey B. Lepekhov, Cand. Sci. (Agriculture), Head of a Laboratory, Federal Altai Scientific Centre of Agro-Biotechnologies, 35 Nauchny Gorodok, Barnaul 656910, Russia, sergei.lepehov@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-1561-6345

Статья поступила в редакцию 30.12.2025; одобрена после рецензирования 08.04.2026; принята к публикации 22.04.2026.
The article was submitted on 30.12.2025; approved after reviewing on 08.04.2026; accepted for publication on 22.04.2026.

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

Научная статья
УДК 633.111.1:581.154:632.12
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o5

CC BY

Рекомбинантные линии, производные одного необычного растения, найденного в посеве мягкой пшеницы ‘ТАМ 200’, как исходный материал для селекции

О. П. Митрофанова[1], А. Г. Хакимова[1], Г. И. Пендинен[1], О. В. Яковлева[1], В. А. Лосева[2]

[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, Екатерининская опытная станция – филиал ВИР, Тамбовская область, Россия

Автор, ответственный за переписку: Ольга Павловна Митрофанова, o.mitrofanova@vir.nw.ru

Актуальность. Родственные мягкой пшенице виды и роды – важные источники обогащения ее генетического разнообразия. Среди растений образца ‘ТАМ 200’ (США), имеющего в родословной интрогрессивную родительскую форму, было обнаружено нетипичное растение, и от него получены рекомбинантные линии (РЛ). Цель исследования – определить цитогенетические особенности РЛ, охарактеризовать линии по агрономическим признакам и устойчивости к ионам Al^{3+}.

Материалы и методы. Многолетним индивидуальным отбором потомков от самоопыления нетипичного растения на хорошую перезимовку и продуктивность получена серия из 21 РЛ. Число хромосом у РЛ и присутствие интрогрессий генетического материала ржи посевной и пырея промежуточного определяли методом геномной гибридизации *in situ* (GISH). В полевых условиях Северо-Западного и Центрально-Черноземного регионов РФ оценивали агрономические признаки РЛ и в лабораторных условиях – устойчивость к ионам Al^{3+}.

Результаты. Все РЛ имели 42 хромосомы, среди них у семи РЛ выявлена интрогрессия генетического материала ржи в одной паре хромосом, у четырех – в двух парах хромосом, и одна линия имела транслокацию 1RS ржи в хромосоме генома B мягкой пшеницы. У девяти РЛ генетический материал ржи не обнаружен, у всех РЛ не выявлен генетический материал пырея промежуточного. В обоих регионах испытания РЛ хорошо зимовали, а по признакам продуктивности незначительно отличались от стандарта ‘Мироновская 808’. В годы изучения в Центрально-Черноземном регионе РЛ4, РЛ11, РЛ16 и РЛ21 были высокоустойчивыми к мучнистой росе, а по данным лабораторной оценки семь РЛ – высокоустойчивыми и устойчивыми к токсическому действию ионов алюминия.

Заключение. Созданные РЛ представляют интерес для дальнейших исследований и селекции мягкой пшеницы на устойчивость к стрессовым факторам среды.

Ключевые слова: *Triticum aestivum*, *Secale cereale*, интрогрессия, GISH, агрономические признаки, перезимовка, устойчивость к Al^{3+}, мучнистая роса

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: Митрофанова О.П., Хакимова А.Г., Пендинен Г.И., Яковлева О.В., Лосева В.А. Рекомбинантные линии, производные одного необычного растения, найденного в посеве мягкой пшеницы ‘ТАМ 200’, как исходный материал для селекции. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(2):178-192. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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.

© Митрофанова О.П., Хакимова А.Г., Пендинен Г.И., Яковлева О.В., Лосева В.А., 2026

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

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o5

Recombinant lines, derived from a single unusual plant found in a field sown with bread wheat 'TAM 200', as source material for breeding

Olga P. Mitrofanova[1], Anida G. Khakimova[1], Galina I. Pendinen[1], Olga V. Yakovleva[1], Valentina A. Loseva[2]

[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, Yekaterinino Experiment Station – branch of VIR, Tambov Province, Russia*

Corresponding author: Olga P. Mitrofanova, o.mitrofanova@vir.nw.ru

Background. Species and genera related to bread wheat are important sources of enrichment for its genetic diversity. An atypical plant was found among the plants of cv. 'TAM 200' (USA), which had an introgressive parent in its pedigree, and recombinant lines (RLs) were obtained from it. The objective of this study was to identify cytogenetic features of the RLs and characterize them in the context of agronomic traits and resistance to Al^{3+} ions.
Materials and methods. A series of 21 RLs were obtained by long-term individual selection among the descendants from self-pollination of the atypical plant for good overwintering and productivity. The number of chromosomes in the RLs and the presence of introgressions of genetic material from common rye and intermediate wheatgrass were established through genomic *in situ* hybridization (GISH). Agronomic characteristics of the RLs were evaluated in the field in the Northwestern and Central Black Earth Regions of Russia, and their resistance to Al^{3+} ions was assessed in the laboratory.
Results. All RLs had 42 chromosomes. Seven among them had an introgression of rye genetic material in one pair of chromosomes, four RLs had such introgressions in two pairs of chromosomes, and one line revealed a 1RS rye translocation in the B genome chromosome of bread wheat. Nine RLs did not contain rye genetic material, while intermediate wheatgrass genetic material was absent in all RLs. In both regions of testing, the RLs wintered well, and their productivity was slightly lower than that of the reference 'Mironovskaya 808'. In the years of testing in the Central Black Earth Region, RL4, RL11, RL16, and RL21 manifested high resistance to powdery mildew, and laboratory assessment data showed that seven RLs were highly resistant or resistant to the toxic effects of aluminum ions.
Conclusion. The developed RLs are of interest for further research and bread wheat breeding for resistance to environmental stressors.

Keywords: *Triticum aestivum*, *Secale cereale*, introgression, GISH, agronomic traits, overwintering, resistance to Al^{3+}, powdery mildew

Acknowledgments: the research was conducted within the framework of the state task according to VIR's thematic plan, 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: Mitrofanova O.P., Khakimova A.G., Pendinen G.I., Yakovleva O.V., Loseva V.A. Recombinant lines, derived from a single unusual plant found in a field sown with bread wheat 'TAM 200', as source material for breeding. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(2):178-192. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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

Обогащение озимой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.; 2n = 6x = 42, BBAADD) генетическим материалом других видов и родов – одна из стратегических задач, решение которой позволит повысить потенциал этой культуры для проведения фундаментальных исследований и использования в селекции (Boehm Jr., Cai, 2024; Plotnikova, Knaub, 2024). В коллекции озимой мягкой пшеницы ВИР имеется сорт 'TAM 200' (к-61610), выведенный и допущенный к использованию в США в 1984 г. (Nelson et al., 1973). Согласно описанию (https://washingtoncrop.com/documents/Archives-Wheat/Centurk-Lancer.pdf), сорт 'TAM 200' среднеранний, короткостебельный, с очень хорошей способностью к кущению; зерно мелкое, с высоким содержанием белка; масса зерна с колоса очень хорошая; зимостойкость «оставляет желать лучшего». Его родословная: TX391-56-D8/Tascosa//Centurk*3/Amigo, в которой TX391-56-D8, или Sturdysib, – линия. 'Tascosa' – сорт, обладающий прочной соломиной и очень жесткими колосковыми чешуями, способствующими его устойчивости к осыпанию при неблагоприятных условиях (Finkner et al., 1967). Сорт 'Centurk' отличается хорошей зимостойкостью, превосходными мукомольными и хлебопекарными характеристиками, устойчив к листовой и стеблевой ржавчинам, толерантен к токсичному действию ионов алюминия (Schmidt, 1978; Taylor, Foy, 1985; http://wheatpedigree.net/sort/show/11983; https://washingtoncrop.com/documents/Archives-Wheat/Centurk-Lancer.pdf). В генотипе последнего члена родословной, сорта 'Amigo', присутствует транслокация T1AL.1RS от аргентинского сорта 'Insave' ржи посевной *Secale cereale* L. (2n = 2x = 14; RR) с генами устойчивости к обыкновенной злаковой тле (*Gb2*), мучнистой росе (*Pm17*), а также с одним из генов запасного белка зерновки секалина (*Sec1*). Кроме того, 'Amigo' содержит транслокацию T1BL.1BS-3Ae#1L пырея удлиненного *Thinopyrum ponticum* (Podp.) Z.-W. Liu & R.-C. Wang. (2n = 10x = 70; $JJJJ^sJ^sJ^sJ^sJ^s$, или $EEE^bE^bE^xE^xS^tS^tS^tS^t$) с генами *Sr24*/*Lr24* устойчивости к стеблевой и листовой ржавчинам (Jiang et al., 1994; Plotnikova, Knaub, 2024). С использованием молекулярных маркеров в генотипах образцов пшеницы из коллекции ВИР 'TAM 200' (к-61610) и 'Amigo' (к-65405) подтвердилось присутствие ржаной транслокации T1A.1R и чужеродного гена устойчивости к стеблевой ржавчине *Sr24* (Baranova et al., 2018).

В 2007 г. на делянке образца 'TAM 200' обнаружили растение с необычной серо-дымчатой, с примесью коричневого цвета, окраской колосьев и наличием жестких колосковых чешуй. Зерновка, из которой получено данное растение, могла (1) быть результатом случайного засорения образца, (2) образоваться вследствие опыления 'TAM 200' неизвестной формой, (3) появиться от цитологически нестабильного растения этого сорта. В настоящей статье подведены итоги многолетнего индивидуального отбора потомков этого растения на хорошую перезимовку и продуктивность в условиях Северо-Западного региона РФ, приведшего к получению серии линий. Если допустить участие сорта 'TAM 200' в происхождении обнаруженного нами необычного растения, то в генотипах линий могут присутствовать транслокации ржи и пырея удлиненного и многие ценные в селекционном отношении аллели генов.

Цель исследования – определить цитогенетические особенности полученных рекомбинантных линий (далее РЛ), охарактеризовать их по агрономическим признакам, а также по устойчивости к ионам Al^{3+}, оценить перспективы их использования как исходного материала для селекции.

Материалы и методы

Основным материалом для работы послужили созданные рекомбинантные линии: РЛ1 (к-69184), РЛ2 (к-69185), РЛ3 (к-69186), РЛ4 (к-69187), РЛ5 (к-69188), РЛ6 (к-69189), РЛ7 (к-69190), РЛ8 (к-69191), РЛ9 (к-69192), РЛ10 (к-69193), РЛ11 (к-69194), РЛ12 (к-69195), РЛ13 (к-69196), РЛ14 (к-69197), РЛ15 (к-69198), РЛ16 (к-69199), РЛ17 (к-69200), РЛ18 (к-69201), РЛ19 (к-69202), РЛ20 (к-69203), РЛ21 (к-69204).

При лабораторной оценке устойчивости к токсическому действию ионов алюминия, наряду с сортами-тестерами с известной реакцией 'Atlas 66' (к-44977, США) и 'Ленинградка' (к-47882, Россия), которые использовали для контроля проявления реакции, оценивали также образцы озимой мягкой пшеницы 'TAM 200' (к-61610) и 'Amigo' (к-65405) с целью их характеристики по данному признаку.

Полевые исследования проводили согласно методическим указаниям ВИР (Merezhko et al., 1999). Все РЛ оценены в условиях Северо-Западного региона на научно-производственной базе (НПБ) «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» (г. Пушкин) в сезоны 2018/2019 и 2020/2021 г., а из них 19 РЛ (не изучали РЛ8 и РЛ15) – также в Центрально-Черноземном регионе (Тамбовская обл., Екатерининская опытная станция – филиал ВИР) в сезоны 2021/2022 и 2022/2023 г. В качестве сорта-стандарта в обоих пунктах полевого изучения использовали сорт 'Мироновская 808' (к-43920, СССР, Украинская ССР). Предпосевную подготовку почвы, посев и уход за растениями осуществляли в оптимальные для каждого региона сроки и в соответствии с зональными рекомендациями. Определяли перезимовку РЛ, длительность периода «01 января – колошение» (сутки), высоту растения (см), а также элементы структуры урожая: число продуктивных стеблей (штука, далее шт.), длину колоса (см), число колосков в колосе (шт.), число зерен с колоса (шт.), массу зерна главного колоса (г), массу 1000 зерен (г). При этом в отделе генетических ресурсов пшеницы ВИР каждую линию характеризовали на основе анализа пяти растений, а на Екатерининской опытной станции – снопового материала, собранного с десяти растений во время апробации посевов РЛ. При описании биологических свойств и признаков использовали шкалы (Dorofeev et al., 1984; Merezhko et al., 1999).

В Центрально-Черноземном регионе в условиях естественного инфекционного фона РЛ оценивали по устойчивости к мучнистой росе, возбудитель – *Blumeria graminis* (DC.) Speer f. sp. *tritici* Marchal. Степень устойчивости к названной болезни, а также степень перезимовки определяли по девятибалльным шкалам (Dorofeev et al., 1984), где балл 9 – очень высокая устойчивость или перезимовка, 7 – высокая, 5 – средняя, 3 – низкая, 1 – очень низкая.

Погодные условия полевого изучения РЛ различались как по годам в каждом из названных выше пунктов, так и между пунктами. В сравнении со среднемноголетними данными среднемесячная температура воздуха была более высокой в г. Пушкине в 2018/2019 г. в сентябре, с апреля по июнь, феврале и марте и более низкой – в декаб-

ре 2021/2022 г. (рис. 1, а). В с. Екатеринино в оба года изучения она была выше среднемноголетней для этого пункта или не отличалась от нее (рис. 1, в). Исключением оказался октябрь 2021/2022 г. с более низкой температурой воздуха.

Количество выпавших помесячных осадков в обоих пунктах варьировало (рис. 1, б, г). В сравнении со среднемноголетними данными по каждому из пунктов, оно было почти в два-три раза или меньше (г. Пушкин, 2018/2019 г. – с октября по декабрь, апрель, июнь, август; 2021/2022 г. – сентябрь, ноябрь, с марта по июнь; с. Екатеринино, 2021/2022 г. – октябрь, декабрь, август; 2022/2023 г. – апрель, май, июль, август), или больше (г. Пушкин, 2018/2019 г. – с января по март, май, июль; 2021/2022 г. – январь, февраль, август; с. Екатеринино, 2021/2022 г. – сентябрь, ноябрь, с января по апрель, июнь, июль; 2022/2023 г. – с сентября по январь, март, июнь).

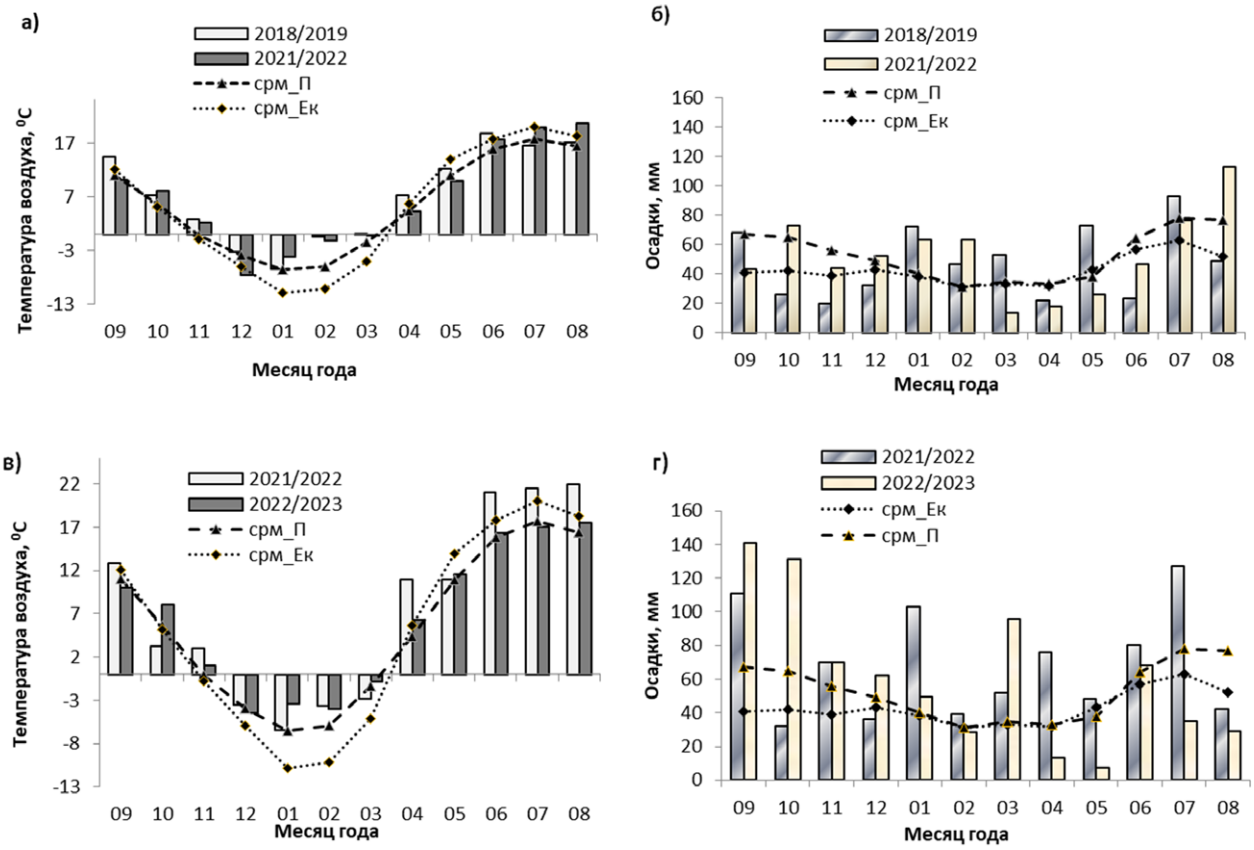


Рис. 1. Показатели погоды во время проведения полевых исследований по данным https://world-weather.ru/pogoda/russia/pushkin (а, б) и метеостанции с. Екатеринино (в, г)

Fig. 1. Weather indicators during the field trials according to https://world-weather.ru/pogoda/russia/pushkin (а, б) and the weather station in Yekaterinino (в, г)

На развитие растений пшеницы, их продуктивность могли повлиять в г. Пушкине в 2018/2019 г. недостаток осадков с октября по декабрь, а в с. Екатеринино в оба года изучения – более высокие для этого пункта температуры в сочетании с избыточными осадками в осенние и зимние месяцы, особенно в 2022/2023 г.

Оценка устойчивости растений к действию ионов Al^{3+}. Лабораторную оценку устойчивости РЛ и образцов к-61610 'ТАМ 200' и к-65405 'Amigo' к действию токсичных ионов алюминия определяли на проростках (Yakovleva et al., 2009; Yakovleva, 2021). Семена изучаемых линий и образцов сначала на протяжении двух суток проращивали в термостате (t = 24–25°C) без освещения в чашках Петри на фильтровальной бумаге, хорошо смоченной дистиллированной водой. Затем 25–30 проросших семян каждого из них переносили в ячейки растилен с сетчатым дном, накрывали полиэтиленовой пленкой и помещали в пластмассовые девятилитровые контейнеры с дистиллированной водой (pH = 6,5; t = 20–22°C; освещенность – 5кЛк/16 ч). На третьи сутки пленку снимали, воду в опытном варианте заменяли на водный раствор с концентрацией ионов Al^{3+} 185 мкМ (pH = 4,0), а pH растворов поддерживали на исходном уровне в течение эксперимента. На седьмые сутки проращивания у проростков одновременно измеряли длину зародышевых корней и ростков и рассчитывали их средние арифметические значения. Индекс длины корня (ИДК) определяли как соотношение средней длины корня в «опыте» к средней длине корня в «контроле». Аналогичным образом определяли индекс длины ростка (ИДР).

На основании полученных значений ИДК и ИДР линии и образцы мягкой пшеницы группировали по устойчивости к ионам Al^{3+}: ≥ 0,81 – высокоустойчивые; 0,61–0,80 – устойчивые; 0,41–0,60 – среднеустойчивые; 0,31–0,40 – среднечувствительные; < 0,30 – неустойчивые (Yakovleva, Kovaleva, 2015).

Идентификация генетического материала ржи и пырея промежуточного в геномах РЛ методом геномной

гибридизации in situ (*GISH*). Для получения препаратов митотических хромосом корешки проростков изучаемых линий помещали в воду со льдом (0°С) на сутки, затем фиксировали в уксуснокислом алкоголе (96-процентный этанол : ледяная уксусная кислота – 3 : 1). Фиксированный материал хранили в морозильнике (–20°С) до использования. Подготовку препаратов, мечение ДНК, геномную гибридизацию *in situ* (GISH) проводили по методике (Scholz et al., 2009; Scholz, Pendinen, 2016).

Геномную ДНК *Thinopyrum intermedium* (Host) Barkworth & D.R. Dewey (2n = 6x = 42; JJJ^{s}J^{s}S^{t}S^t, или EEEstEstS^{t}S^t), *Secale cereale* L., *Aegilops speltoides* Tausch (2n = 2x = 14; BB) и *Triticum urartu* Thumanjan ex Gandilyan (2n = 2x = 14; AA) метили методом Nick-трансляции с помощью наборов DIG-Nick Translation Mix и Bio-Nick Translation Mix (Jena Bioscience).

В пробах для гибридизации использовали дифференциально меченые ДНК одного из видов *Thinopyrum* Á Löve и вида ржи (*Secale cereale*), в качестве блокирующей – ДНК *Triticum aestivum*. Как показали наши предыдущие исследования, наличие хромосом пырея у гибридных форм в GISH-анализе идентифицируется как с использованием меченой ДНК *Thinopyrum intermedium*, так и *T. ponticum*. Исходя из ограниченных ресурсов, в пробы для гибридизации включали лишь меченую ДНК *T. intermedium*.

При анализе линии РЛ21 для идентификации геномной принадлежности пшеничного плеча рекомбинатной пшенично-ржаной хромосомы в состав гибридизационной смеси для идентификации геномов A и B пшеницы включали дифференциально меченые ДНК *Aegilops speltoides* (DIG) и *Triticum urartu* (BIO). ДНК *Secale cereale* (2n = 2x = 14; RR) использовали в качестве блокирующей. В этом случае в процессе GISH наблюдается некоторый уровень кросс-гибридизации хромосом генома D с мечеными ДНК геномов A и B, что позволяет их выявить и отличать от хромосом ржи.

Геномную *in-situ*-гибридизацию проводили, взяв за основу стандартные методики (Leitch et al., 1994; Zhang et al., 2001; Scholz, Pendinen, 2016). В двухцветной GISH-FISH для детекции биотиновой пробы использовали streptavidin–Rhodamine (streptavidin, Rhodamine Red™ – X conjugate, *in vitro* gene by Thermo Fisher Scientific), для детекции дигоксигениновой метки – digoxigenin-FITC (Roche Diagnostics). Хромосомы контрастировали раствором DAPI (1,0 ng/μL).

Для анализа препаратов, создания и обработки изображений использовали эпифлуоресцентный микроскоп Axio Imager M2 с камерой Axio Cam MRm и программным обеспечением Axio Vision Rel 4.8, а для оптимизации яркости и контраста изображений – программу Adobe Photoshop 6.0.

Статистическая обработка данных. Средние арифметические значения признаков и их ошибки ($M \pm m_M$) рассчитывали в программе Microsoft Excel. В зависимости от наличия/отсутствия в одной или двух хромосомах пшеницы генетического материала ржи РЛ были объединены в группы А – Г, содержащие от одной до девяти линий. Для одновременного сравнения полученных групп линий по длительности периода «01 января – колошение» (сутки) и другим хозяйственно важным признакам использовали ранговый критерий Крускала – Уоллиса (Zaitsev, 1984). О достоверности различий судили по величине хи-квадрата. Критическая величина хи-квадрата на уровне значимости $W = 0,05$ при $df = 2$ равна 5,991.

Результаты

Получение рекомбинантных линий

Осенью 2007 г. на поле НПБ «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» были высеяны все семена с найденного нетипичного растения; они дали всходы и в стадии кущения ушли под зиму, из них 58 растений успешно перезимовали. В 2008 г. полученные растения были объединены в условные группы с учетом их фенотипических особенностей. Так, группу с «пшеничным морфотипом» образовали 35 полукарликовых растений (высота – 65–68 см, число зерновок с колоса – 18–45 шт.) и 16 карликовых (высота – 21–30 см и число зерновок с колоса – 1–30 шт.). К группе «синтетики» отнесено шесть растений высотой 40–43 см и с числом зерновок с колоса 7–18 шт. Наконец, группу «эгилопсы» представляло одно растение с двумя зерновками.

Полукарликовые растения с «пшеничным морфотипом» по признакам колоса и зерновки были отнесены к разновидностям *glauco-ferrugineum* и *ferrugineum*, *glauco-milturum* и *milturum*, *lutescens*, *erythrospermum*. Среди них встречались растения с легким и трудным обмолотом и разным размером колоса. Со всеми растениями с «пшеничным морфотипом» исследования продолжили, от них были заложены самоопыляющиеся линии. Многолетний (2009–2021 гг.) индивидуальный отбор лучших растений этих линий с проверкой по потомству на стабильную перезимовку, определенную высоту растения, продуктивность колоса в условиях Северо-Западного региона (г. Пушкин) привел к созданию 21 константной РЛ, которые прежде всего были проверены на наличие чужеродного генетического материала ржи и пырея.

Цитогенетический анализ показал, что клетки корешков проростков рекомбинантных линий содержали 42 хромосомы (табл. 1). Методом GISH ни у одной из РЛ не выявлен генетический материал пырея. Кроме того, у девяти линий не выявлено также интрогрессий генетического материала ржи (рис. 2, a).

Напротив, у РЛ5, РЛ6, РЛ15-РЛ17, РЛ19 и РЛ20 была обнаружена пара хромосом с небольшим, едва различимым терминальным фрагментом, гибридизующимся с ДНК ржи (см. табл. 1), а у четырех линий (РЛ9–РЛ12) выявлены две пары хромосом с подобными терминальными фрагментами; при этом у одной пары они были очень маленькими, едва различимыми, у другой – небольшими, но хорошо различимыми (рис. 2, b). Было выдвинуто предположение, что это пометились сайты 45S(25/18S) рДНК, поскольку они имеют высокую степень гомологии у разных объектов, и в нашем эксперименте могла произойти гибридизация соответствующих участков хромосом пшеницы с гомеологичной последовательностью ДНК ржи. Использование в пробе для гибридизации дифференциально меченых ДНК ржи и 25/18S рДНК показало, что фрагменты хромосом, гибридизующиеся с ДНК ржи, не совпадают с сайтами 25/18S рДНК (рис. 2, c). Поскольку при изучении разных РЛ и использовании одинаковых проб для гибридизации терминальные участки хромосом с ржаной меткой выявлялись лишь у некоторых линий, можно предположить, что это рекомбинантные хромосомы с интрогрессией генетического материала ржи.

Особый интерес представляла РЛ21, у нее присутствовала пара хромосом с одним плечом 1R-хромосомы ржи (плечо со спутником), второе плечо принадлежало одной из хромосом генома B пшеницы (рис. 2, d, e).

Таблица 1. Присутствие генетического материала ржи в геномах отобранных рекомбинантных линий
Table 1. The presence of rye genetic material in the genomes of the selected recombinant lines

Группа (число линий)	Рекомбинантная линия (№ по каталогу ВИР)	Число хромосом (2n)	GISH с ДНК *Secale cereale*	
			число хромосом	
			ржи*	пшеницы с интрогрессией ржи*
А (9)	РЛ1 (к-69184), РЛ2 (к-69185), РЛ3 (к-69186), РЛ4 (к-69187), РЛ7 (к-69190), РЛ8 (к-69191), РЛ13 (к-69196), РЛ14 (к-69197), РЛ18 (к-69201)	42	0	0
Б (7)	РЛ5 (к-69188), РЛ6 (к-69189), РЛ15 (к-69198), РЛ16 (к-69199), РЛ17 (к-69200), РЛ19 (к-69202), РЛ20 (к-69203)	42	0	2**
В (4)	РЛ9 (к-69192), РЛ10 (к-69193), РЛ11 (к-69194), РЛ12 (к-69195)	42	0	4***
Г (1)	РЛ21 (к-69204)	42	2 (1RS.B)****	

Примечания: * – хромосомы или фрагменты хромосом пшеницы, гибридизующиеся с меченой ДНК ржи; ** – пара хромосом пшеницы с очень маленьким, едва различимым терминальным фрагментом гибридизации с ДНК ржи; *** – одна пара хромосом пшеницы с очень маленьким, едва различимым терминальным фрагментом и другая пара хромосом пшеницы с хорошо различимым небольшим терминальным фрагментом гибридизации с ДНК ржи; **** – пара перестроенных хромосом: одно плечо – короткое 1R со спутником, второе плечо не идентифицированной хромосомы генома В пшеницы

Notes: * – wheat chromosomes or their fragments hybridizable with labeled rye DNA; ** – a pair of wheat chromosomes with a very small, barely discernible terminal fragment of hybridization with rye DNA; *** – one pair of wheat chromosomes with a very small, barely discernible terminal fragment of hybridization with rye DNA, and another pair of wheat chromosomes with a clearly discernible small terminal fragment of hybridization with rye DNA; **** – a pair of rearranged chromosomes: one arm is the short arm of the rye 1R chromosome with a satellite, while the second arm belongs to an unidentified chromosome of the wheat B genome

Учитывая описанное выше сходство РЛ по наличию генетического материала ржи, линии были объединены в четыре группы: А – девять линий, у которых не был выявлен генетический материал ржи, Б – семь линий с фрагментами генетического материала ржи в одной паре хромосом, В – четыре линии с фрагментами ржи в двух хромосомах и Г – одна линия с транслокацией TB.1RS (см. табл. 1). Далее для удобства представления результатов изучения различных признаков РЛ, а также выявления влияния генетического материала ржи на проявление признаков были получены сводные показатели для названных групп РЛ и проведено сравнение групп.

Хозяйственно ценные признаки линий

Независимо от пункта изучения, все РЛ имели или сходную продолжительность периода с 1 января до колошения с сортом ‘Мироновская 808’, или в некоторые годы на двое – четверо суток меньше (табл. 2, 3).

По высоте растений все РЛ были среднерослыми (81–110 см), за исключением РЛ21, которая в условиях с. Екатеринино была низкорослой в оба сезона изучения. В 2022/2023 г. в этом пункте большинство РЛ оказались «низкорослыми», что можно объяснить негативным влиянием избыточного количества осадков на рост и ранние стадии развития растений пшеницы.

У РЛ значения признаков «длина колоса», «число зерен с колоса» и «масса зерна колоса» различались в зависимости от пункта и года изучения в каждом из пунктов (см. табл. 2, 3). Несмотря на варьирование значений названных выше признаков, созданные линии были охарактеризованы как имеющие в условиях г. Пушкина в основном средний или короткий по длине колос, со средним или малым числом зерен и малой или средней массой зерна. В условиях с. Екатеринино у РЛ был средний или длинный колос, со средним или большим числом зерен в нем и средней или большой массой зерна. Возможно, более высокие температуры в с. Екатеринино по сравнению с г. Пушкином больше способствовали росту и развитию колоса у растений РЛ.

Масса 1000 зерен у РЛ в обоих пунктах в годы изучения изменялась от «малой» до «очень большой».

Рассчитанные значения хи-квадратов при сравнении групп РЛ по методу Крускала – Уоллиса приведены в таблице 4. Как следует из полученных данных, в условиях г. Пушкина статистически достоверными оказались различия между названными выше группами линий в один или оба года изучения по высоте растения, длине колоса, числу колосков в колосе и массе зерна колоса. В остальных случаях между группами линий по степени проявления изученных признаков существовали лишь случайные различия. РЛ в условиях с. Екатеринино достоверно различались лишь по длине колоса в сезон 2022/2023 г.

Устойчивость к стрессовым факторам среды

Устойчивость РЛ к стрессовым условиям зимних периодов получила свое подтверждение при их полевой оценке в условиях с. Екатеринино. Проявление устойчивости не зависело от присутствия в генотипах РЛ генетического материала ржи (табл. 5). Так, в сезон 2021/2022 г. у РЛ2, РЛ9 (группа А) и РЛ11 (группа В) степень перезимовки была средней – 5 баллов, а у всех остальных РЛ – высокой (7 баллов). В сезон 2022/2023 г. низкую перезимовку (3 балла) показала РЛ1, среднюю – РЛ2–РЛ5 и РЛ20 (группы А и Б), все остальные линии, как и ‘Мироновская 808’, продемонстрировали высокий и очень высокий уровни перезимовки.

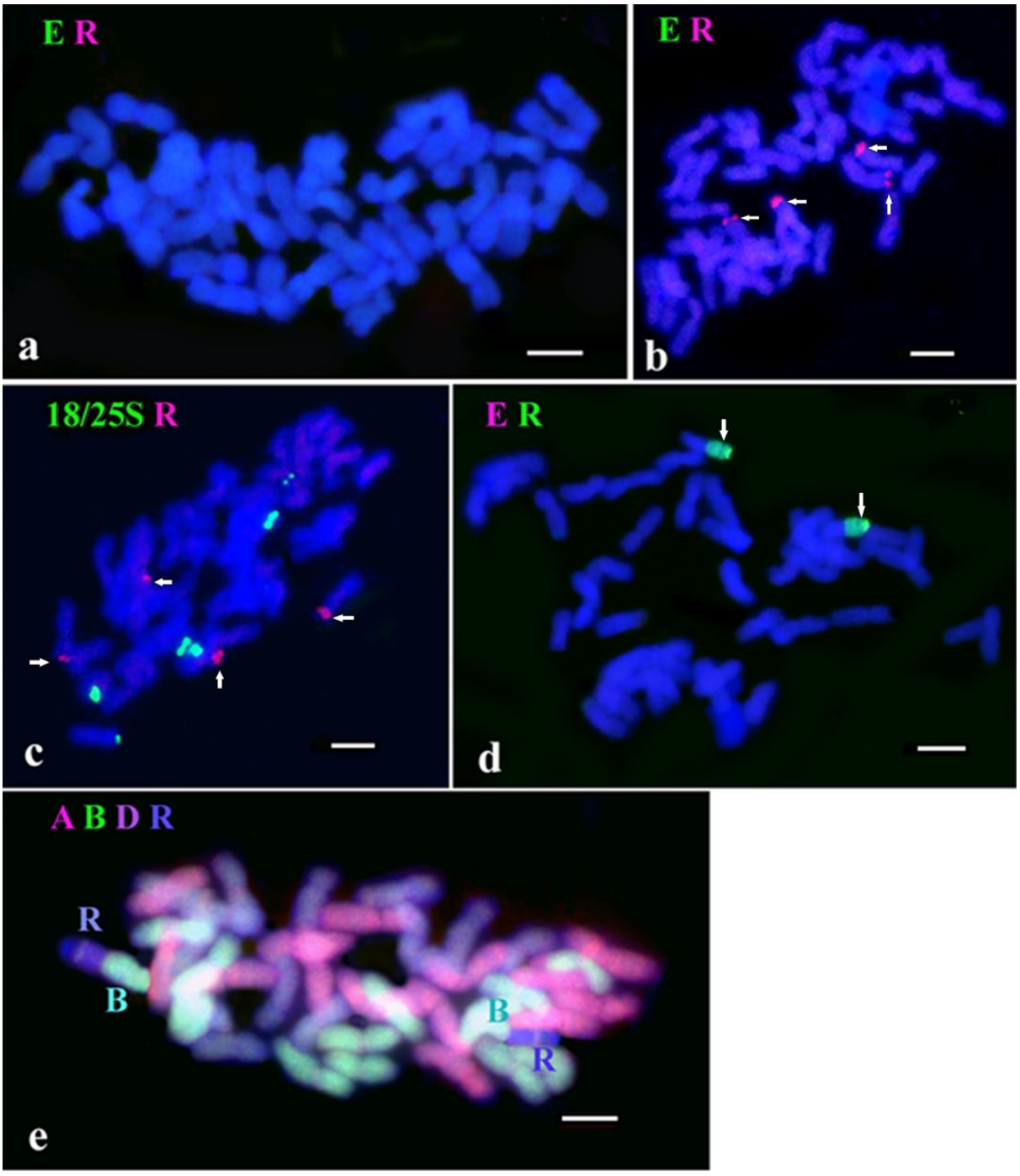


Рис. 2. Результаты GISH-анализа рекомбинантных линий (РЛ) с использованием дифференциально меченых ДНК *Thinopyrum intermedium* и *Secale cereale*: a) РЛ7 – линия с пшеничными хромосомами; **b) РЛ11 –** линия с одной парой хромосом с очень маленьким терминальным фрагментом (стрелки) и с другой парой хромосом с хорошо различимым небольшим терминальным фрагментом гибридизации с ДНК ржи; **c) РЛ11 –** меченые ДНК фрагменты ржи не совпадают с сайтами 45S (18/25S) рДНК; **d) РЛ21 –** линия с рекомбинантной парой хромосом, в которых одно из плеч хромосомы пшеницы замещено коротким плечом ржаной хромосомы 1R; **e) результаты GISH РЛ21** с дифференциально-мечеными ДНК геномов A (красный) и B (зеленый). Видна пара B-R рекомбинантных хромосом. На рисунках **b**, **c**, **d** стрелками обозначены небольшие терминальные фрагменты генетического материала ржи

Fig. 2. Results of the GISH analysis of recombinant lines (RLs) using differentially labeled DNAs of *Thinopyrum intermedium* and *Secale cereale*: a) RL7 – no alien genetic material has been identified; **b) RL11 –** two pairs of wheat chromosomes have been identified: one with a very small, barely discernible terminal fragment of hybridization with rye DNA, and the other with a clearly discernible small terminal fragment of hybridization with rye DNA; **c) RL11 –** labeled DNA fragments of rye do not match the 45S (18/25S) rDNA sites; **d) RL21 –** a recombinant chromosome has been identified, one arm of which is the short arm of the 1R rye chromosome; **e) RL21 – GISH results** with differentially labeled DNAs of the A (red) and B (green) genomes. A pair of B-R recombinant chromosomes is visible. In subfigures **b**, **c**, and **d**, arrows indicate small terminal fragments of rye genetic material

Таблица 2. **Результаты оценки рекомбинантных линий (РЛ) в полевых условиях Северо-Западного региона РФ (г. Пушкин, 2018/2019 и 2020/2021 г.)**
Table 2. **Results of the field evaluation of the recombinant lines (RLs) in the Northwestern Region of Russia (Pushkin, 2018/2019 and 2020/2021)**

Признак	Год изучения	Группа А (n = 9)	Группа Б (n = 7)	Группа В (n = 4)	Группа Г (РЛ21)	'Мироновская 808' (стандарт)
		M ± $m_м$	M ± $m_м$	M ± $m_м$	M/lim*	M/lim
Продолжительность периода «01 января – колошение», сут.	2018/2019	153,6 ± 1,0	154,3 ± 0,4	153,5 ± 0,3	155	157
	2020/2021	158,0 ± 0,7	157,9 ± 0,6	156,8 ± 0,3	160	157
Высота растения, см	2018/2019	100,0 ± 3,1	102,6 ± 2,2	102,7 ± 1,0	80,6/78–85*	102/96–105
	2020/2021	94,1 ± 2,8	92,4 ± 2,0	110,5 ± 3,2	83,6/80–87	106,3/95–114
Число продуктивных стеблей, шт.	2018/2019	11,3 ± 0,6	10,6 ± 1,0	10,1 ± 1,0	12/11–15	10/7–12
	2020/2021	5,6 ± 0,5	6,5 ± 0,3	5,9 ± 0,4	7,8/5–10	8,5/6–12
Длина колоса, см	2018/2019	8,3 ± 0,2	7,6 ± 0,3	8,8 ± 0,1	7,2/7,0–7,5	9,2/8,0–10,0
	2020/2021	6,3 ± 0,3	5,8 ± 0,1	7,7 ± 0,2	6,4/5,5–7,0	7,8/6,5–8,5
Число колосков в колосе, шт.	2018/2019	15,5 ± 0,3	14,2 ± 0,3	15,6 ± 0,4	14,2/13–15	17/17
	2020/2021	12,9 ± 0,3	11,9 ± 0,3	14,0 ± 0,2	12,4/11–14	13,9/12–16
Число зерен с колоса, шт.	2018/2019	33,2 ± 1,3	29,5 ± 1,8	35,0 ± 2,6	42,4/39–44	35,7/30–40
	2020/2021	23,6 ± 1,5	20,9 ± 0,8	26,2 ± 1,1	28,4/23–36	27/16–42
Масса зерна главного колоса, г	2018/2019	1,87 ± 0,08	1,63 ± 0,10	2,06 ± 0,13	1,69/1,6–2,0	2,19/1,9–2,4
	2020/2021	0,99 ± 0,07	0,88 ± 0,04	1,15 ± 0,04	0,90/0,7–1,2	1,36/0,8–2,2
Масса 1000 зерен, г	2018/2019	56,60 ± 1,92	55,50 ± 1,23	58,90 ± 1,16	39,91/35,5–45,5	61,57/59,0–64,0
	2020/2021	41,50 ± 1,31	42,00 ± 1,03	44,20 ± 1,02	31,61/29,7–34,7	50,29/47,0–51,9

Примечание: * – наименьшее и наибольшее значения признака
Note: * – the lowest and the highest values of the character

Таблица 3. **Результаты оценки рекомбинантных линий (РЛ) в условиях Центрально-Черноземного региона РФ (с. Екатеринино, 2021/2022 и 2022/2023 г.)**

Table 3. **Results of the field evaluation of the recombinant lines (RLs) in the Central Black Earth Region of Russia (Yekaterinino, 2021/2022 and 2022/2023)**

Признаки	Год	Группа А (n = 8)	Группа Б (n = 6)	Группа В (n = 4)	Группа Г (РЛ21)	‘Мироновская 808’ (стандарт)
		M ± $m_м$	M ± $m_м$	M ± $m_м$	M	M
Продолжительность периода «01 января – колошение», сут.	2021/2022	156,1 ± 1,0	157,5 ± 0,5	155,0±0,0	158	155
	2022/2023	151,0 ± 0,9	150,7 ± 0,7	150,0±0,0	150	154
Высота растения, см	2021/2022	101,3 ± 5,1	105,0 ± 3,9	103,8 ± 4,7	65,0	110,0
	2022/2023	71,3 ± 4,4	78,3 ± 2,5	75,0 ± 3,5	65,0	80,0
Длина колоса, см	2021/2022	11,8 ± 0,4	10,4 ± 0,4	11,2 ± 0,6	6,8	12,8
	2022/2023	8,2 ± 0,2	7,6 ± 0,3	9,50 ± 0,21	7,6	12,0
Число зерен с колоса, шт.	2021/2022	44,5 ± 1,7	43,7 ± 1,8	46,9 ± 1,0	31,4	39,2
	2022/2023	37,2 ± 2,0	35,0 ± 1,8	35,8 ± 2,4	34,0	46,8
Масса зерна главного колоса, г	2021/2022	2,25 ± 0,11	2,00 ± 0,09	2,03 ± 0,05	1,10	1,90
	2022/2023	1,76 ± 0,13	1,55 ± 0,09	1,88 ± 0,13	1,50	2,30
Масса 1000 зерен, г	2021/2022	44,38 ± 1,57	44,50 ± 0,92	42,50 ± 0,65	36,00	48,00
	2022/2023	40,13 ± 2,20	40,33 ± 1,26	43,75 ± 1,49	37,00	43,00

Таблица 4. **Достоверность различий признаков (ранговый критерий Крускала – Уоллиса) между группами рекомбинантных линий А, Б и В в разных пунктах изучения**

Table 4. **Statistical significance of differences (Kruskal–Wallis rank sum test) between the A, Б and B groups of recombinant lines in different testing sites**

Признаки	г. Пушкин		с. Екатеринино	
	год изучения	χ^2	год изучения	χ^2
Продолжительность периода «01 января – колошение», сут.	2019	0,818	2022	4,722
	2021	1,433	2023	0,343
Высота растения, см	2019	0,166	2022	0,117
	2021	8,077*	2023	1,217
Длина колоса, см	2019	7,817*	2022	4,314
	2021	31,144*	2023	9,964*
Число колосков, шт.	2019	8,915*	–	–
	2021	10,081*	–	–
Число зерен с колоса, шт.	2019	2,823	2022	1,794
	2021	4,913	2023	0,964
Масса зерна колоса, г	2019	5,367	2022	2,561
	2021	6,164*	2023	3,566
Масса 1000 зерен, г	2019	1,667	2022	1,652
	2021	2,693	2023	2,937

Примечание: * – различия достоверны на уровне значимости W = 0,05 при df = 2, критическая величина χ^2 равна 5,991); «–» – не изучали

Note: * – the differences are significant at the significance level of W = 0.05, df = 2, the critical χ^2 value is 5.991); "–" – not studied

Таблица 5. **Уровень перезимовки и устойчивости к мучнистой росе рекомбинатных линий (с. Екатеринино)**

Table 5. **Overwintering and powdery mildew resistance levels of the recombinant lines (Yekaterinino)**

№ по каталогу ВИР	Образец	Группа*	Перезимовка, балл		Устойчивость к мучнистой росе, балл	
			2021/2022	2022/2023	2022	2023
43920	'Мироновская 808' (стандарт)		7	7	5	5
69184	РЛ1	А	7	3	5	7
69185	РЛ2	А	5	5	3	7
69186	РЛ3	А	7	5	5	7
69187	РЛ4	А	7	5	7	7
69188	РЛ5	Б	7	5	5	9
69189	РЛ6	Б	7	7	5	9
69190	РЛ7	А	7	7	5	5
69192	РЛ9	В	7	7	5	5
69193	РЛ10	В	7	7	5	5
69194	РЛ11	В	5	7	9	7
69195	РЛ12	В	7	9	7	5

Таблица 5. Окончание

Table 5. The end

№ по каталогу ВИР	Образец	Группа*	Перезимовка, балл		Устойчивость к мучнистой росе, балл	
			2021/2022	2022/2023	2022	2023
69196	РЛ13	А	5	9	5	5
69197	РЛ14	А	7	7	5	5
69199	РЛ16	Б	7	7	7	7
69200	РЛ17	Б	7	7	5	5
69201	РЛ18	А	7	7	5	5
69202	РЛ19	Б	7	7	5	7
69203	РЛ20	Б	7	5	3	5
69204	РЛ21	Г	7	9	9	9

Примечание: * – группы по наличию генетического материала ржи: А – генетический материал ржи не выявлен; Б – фрагменты генетического материала ржи в одной паре хромосом; В – фрагменты ржи в двух хромосомах; Г – одна линия с транслокацией TB.1RS.

Note: * – groups according to the presence of rye genetic material: А – rye genetic material was not detected; Б – fragments of rye genetic material in one pair of chromosomes; В – fragments of rye in two chromosomes; Г – one line with the TB.1RS translocation

Местные популяции (с. Екатеринино) патогена *Blumeria graminis* 2022 и 2023 г. в разной степени поразили растения РЛ. Сорт-стандарт ‘Мироновская 808’, по многолетним данным, полученным в этом пункте, относится к среднеустойчивым образцам (5 баллов). В 2022–2023 гг. на естественном инфекционном фоне он также проявил среднюю устойчивость (см. табл. 5). По сравнению с ним низкую устойчивость (3 балла) показали РЛ2 (группа А) и РЛ20 (Б), высокую (7 баллов) – РЛ4, РЛ11и РЛ16 (группы А, Б и В), а иммунитет (9 баллов) – РЛ21 (группа Г). Остальные РЛ, как и сорт-стандарт, были среднеустойчивыми.

В лабораторных опытах, в которых проростки семян ‘Atlas 66’ (ИДК = 0,66) и ‘Ленинградка’ (ИДК = 0,65) имели значения ИДК, свидетельствующие об обычном влиянии водного раствора с токсическими ионами Al^{3+} на рост корней этих сортов, РЛ показали различную реакцию. Из них 14 РЛ (61,9% от изученных) по величине индекса длины корня были отнесены к группе «устойчивые» (ИДК = 0,62–0,76), остальные – к группе «среднеустойчи-

Таблица 6. Значения индексов длины корня (ИДК) и ростка (ИДР) у рекомбинантных линий и образцов озимой мягкой пшеницы при проращивании семян на водном растворе, содержащем ионы Al^{3+}

Table 6. Values of the root and sprout length indices in the recombinant lines and accessions of winter bread wheat during seed germination in an aqueous solution containing Al^{3+} ions

№ по каталогу ВИР	Сорт, линия	ИДР	ИДК	№ по каталогу ВИР	Линия	ИДР	ИДК
61610	‘TAM 200’	0,82	0,62	69194	РЛ11	0,90	0,56
65405	‘Amigo’	0,79	0,58	69195	РЛ12	0,85	0,56
69184	РЛ1	0,91	0,65	69196	РЛ13	0,72	0,65
69185	РЛ2	0,78	0,62	69197	РЛ14	0,86	0,63
69186	РЛ3	0,84	0,72	69198	РЛ15	0,78	0,65
69187	РЛ4	0,74	0,65	69199	РЛ16	0,71	0,53
69188	РЛ5	0,78	0,59	69200	РЛ17	0,81	0,76
69189	РЛ6	0,79	0,56	69201	РЛ18	0,76	0,73
69190	РЛ7	0,94	0,59	69202	РЛ19	0,79	0,49
69191	РЛ8	0,95	0,62	69203	РЛ20	0,87	0,71
69192	РЛ9	0,86	0,62	69204	РЛ21	0,79	0,62
69193	РЛ10	0,91	0,58				

вые». Наиболее высокий уровень устойчивости корней к ионам алюминия (ИДК = 0,76) имела РЛ17 (группа Б). Следует отметить, что образец 'ТАМ 200' также был отнесен к группе «устойчивые». РЛ «среднечувствительные» и «неустойчивые» не обнаружены (табл. 6).

По индексу длины ростка все РЛ и оба сорта оказались также в двух группах: «высокоустойчивые» (11 РЛ и 'ТАМ 200') и «устойчивые» (десять РЛ и 'Amigo'). Наиболее высокий индекс длины ростка (ИДР = 0,95) отмечен у РЛ8 (см. табл. 6). Не выявлено РЛ, у которых ростки были «среднеустойчивыми» или «чувствительными» к ионам Al^{3+}.

Всего, одновременно по величинам индексов ростка и длины корней, высокоустойчивыми и устойчивыми оказались семь РЛ, а именно: РЛ1, РЛ3, РЛ8, РЛ9, РЛ14, РЛ 17 и РЛ20.

Обсуждение

К настоящему времени в геном мягкой пшеницы в составе транслокаций, преимущественно T1RS.1BL и T1RS.1AL, или в виде интрогрессий генетического материала разных сортов и инбредных линий культурной ржи (*Secale cereale*; 2n = 2x = 14; RR) и сортов тритикале (× *Triticosecale* Wittmack & A. Camus; 2n = 6x = 42; AABBRR) введены гены, отвечающие за устойчивость к фитопатогенам и вредителям. Среди них – различные аллели генов устойчивости к листовой (*Lr25*, *Lr26*, *Lr45*), стеблевой (*Sr27*, *Sr31*, *Sr50*, *Sr59*, *Sr1RS^{Amigo}*) и желтой (*Yr9*, *Yr49*, *Yr83*, *YrR212*, *YrCn17*, *YrRt1054*) ржавчинам; мучнистой росе (*Pm7*, *Pm8*, *Pm17*, *PmCn17*, *Pm20*, *Pm56*, *PmJZHM2RL*); вирусам желтой карликовости ячменя (*Bdv2*) и полосатой мозаики пшеницы (*Wsm1*); ячменной тле (*Dn7*), обыкновенной злаковой тле (*Gb2*, *Gb6*); гессенской мухе (*H21*, *H25*); овсяной нематоде (*Cre10*) и другим биотическим факторам (Crespo-Herrera et al., 2017; Leonova, 2018; Sivasamy et al., 2018; Adonina et al., 2021; Ren et al., 2022; Ji et al., 2024; https://rye-gene-map.de/rye-introgression/). Кроме того, выявлены гены устойчивости к абиотическим стрессорам, гены, контролирующие признаки продуктивности, качества зерна и другие признаки. Чтобы максимально увеличить вклад ржи в селекцию пшеницы, предложена специальная (комплексная) стратегия, опирающаяся на идею организации глобальной сети сотрудничества. В качестве базы для работы рассматривают коллекцию мирового разнообразия ржи. Предполагается оценка образцов этой коллекции по агрономическим признакам для выделения наиболее ценных генотипов, а также изучение их с использованием современных молекулярно-генетических технологий, в том числе применяемых для высокоточного обнаружения генов и их быстрого клонирования, анализа регуляторных сетей и выяснения генетических основ ключевых для селекции признаков. На заключительном этапе планируется интеграция полученных результатов и внедрение их в селекцию (Han et al., 2025).

На стадии предселекционного изучения (prebreeding) мы отобрали зимостойкие и продуктивные рекомбинантные линии с генетическим материалом ржи. В геномах семи из них присутствует пара хромосом с небольшими, едва различимыми терминальными ржаными фрагментами, у четырех – две пары хромосом с терминальными фрагментами ржи, а у РЛ21 – пара хромосом с транслокацией 1RS в одной из хромосом генома В пшеницы. Хотя четкой связи между наличием/отсутствием генетического материала ржи и фенотипическими особенностями РЛ нам пока установить не удалось, все линии потенциально полезны для пополнения коллекции ВИР как линии с чужеродным генетическим материалом.

В полевых условиях при наличии умеренного инфекционного фона, если судить по степени поражения сорта-стандарта 'Мироновская 808', иммунитет к возбудителю мучнистой росы проявила РЛ21, а высокоустойчивыми были РЛ4, РЛ11, РЛ16. В геномах этих линий, за исключением РЛ4, присутствует генетический материал ржи. Но связано или нет проявление устойчивости с присутствием этого материала еще предстоит доказать.

Особо следует отметить устойчивость РЛ к токсическому действию ионов алюминия. В последние десятилетия механизмы реакции растений на токсичность ионов алюминия интенсивно изучают (Kocjan et al., 2024). Показано, что в кислых почвах (pH < 5,0) Al превращается в мономерные формы ($Al(OH)^{2+}$, Al^{3+}, $Al(OH)^{2+}$ и $Al(OH)^{4-}$), среди которых трехвалентная форма (Al^{3+}) наиболее вредна для роста и развития растений. Она активно взаимодействует с солями фосфорной кислоты, образуя нерастворимые или труднорастворимые фосфаты алюминия, что приводит к дефициту фосфора, доступного растениям. Проникая в корни, ионы Al^{3+} ограничивают усвоение растениями воды и питательных веществ, они ингибируют клеточный цикл и процесс удлинения клеток, что приводит к замедлению роста корней и в конечном итоге – к снижению урожайности (Ofoe et al., 2023). Замедление роста корней используется при лабораторной оценке устойчивости растений к ионам Al^{3+}.

Среди РЛ наиболее высокие показатели одновременно индексов длин ростка и корня имели РЛ1, РЛ3, РЛ8, РЛ9, РЛ14, РЛ17 и РЛ20. Напрямую устойчивость линий к токсическому действию ионов Al^{3+} не зависела от присутствия генетического материала ржи. Созданные линии могли получить ее от 'ТАМ 200', а этот сорт – от 'Centurk'. Однако полностью исключить влияние генетического материала ржи на этот признак нельзя, поскольку при введении транслокаций 1RS.1BL и особенно 1RS.1AL в другие сорта и линии нередко наблюдали существенное увеличение биомассы корней (Sharma et al., 2009).

Заключение

Благодаря многолетнему индивидуальному отбору на хорошую перезимовку и продуктивность в условиях г. Пушкина потомков одного необычного растения, найденного в посеве сорта 'ТАМ 200', создана серия из 21 РЛ. Исследования с использованием метода GISH показали, что все РЛ имели в соматических клетках 42 хромосомы. Из них у семи РЛ выявлена интрогрессия генетического материала ржи в одной паре хромосом, у четырех – в двух парах хромосом, а одна линия содержала транслокацию 1RS ржи в хромосоме генома В мягкой пшеницы. У девяти РЛ генетический материал ржи этим методом не обнаружен, и у всех РЛ не выявлен генетический материал пырея.

В двулетних полевых опытах в географически различных пунктах большинство РЛ хорошо зимовали. По высоте растения они классифицированы преимущественно как среднерослые, а по признакам продуктивности колоса и растения – как незначительно уступающие сорту-стандарту 'Мироновская 808'.

При оценке на естественном инфекционном фоне (с. Екатеринино) иммунитет и высокую устойчивость (9

и 7 баллов) к местным популяциям возбудителя мучнистой росы проявили РЛ21 и РЛ4, РЛ11, РЛ16. Сорт 'Мироновская 808' был среднеустойчивым.

По результатам лабораторной проверки устойчивости к токсическому действию ионов алюминия РЛ отнесены к группам «устойчивые» и «среднеустойчивые». Наиболее высокий уровень устойчивости корней к данному стрессору имела РЛ17.

Комплексную устойчивость к возбудителю мучнистой росы и действию токсичных ионов алюминия проявила РЛ21.

Созданные рекомбинантные линии, независимо от наличия/отсутствия у них чужеродных транслокаций, среднерослые, с хорошими показателями массы зерна с колоса и массы 1000 зерен, при этом хорошо зимующие, устойчивые к возбудителям мучнистой росы и/или токсическому действию ионов алюминия, перспективны для использования в научных исследованиях и отечественной селекции на расширение адаптационного потенциала создаваемых сортов и линий. Что касается вопросов о влиянии ржаных транслокаций на проявление различных признаков и об участии сорта 'ТАМ 200' в происхождении РЛ, то они остались пока открытыми. Для их выяснения, а также для оценки степени генетического сходства и различий РЛ нужно провести специальное исследование с использованием молекулярных маркеров генов различных признаков.

References / Литература

Adonina I.G., Timonova E.M., Salina E.A. Introgressive hybridization of common wheat: results and prospects. *Russian Journal of Genetics*. 2021;57(4):390-407. DOI: 10.1134/S1022795421030029

Baranova O.A., Mikhailova L.A., Kovalenko N.M., Khakimova A.G., Pyukkenen V.P., Mitrofanova O.P. Resistance of winter bread wheat accessions from the VIR plant genetic resources collection to stem rust (*Puccinia graminis* f. sp. *tritici*). Catalogue. St. Petersburg: VIZR; VIR; 2018. [in Russian] (Баранова О.А., Михайлова Л.А., Коваленко Н.М., Хакимова А.Г., Пюккенен В.П., Митрофанова О.П. Устойчивость образцов озимой мягкой пшеницы из коллекции генетических ресурсов растений ВИР к стеблевой ржавчине (*Puccinia graminis* f. sp. *tritici*). Каталог. Санкт-Петербург: ВИЗР; ВИР; 2018).

Boehm Jr. J., Cai X. Enrichment and diversification of the wheat genome via alien introgression. *Plants (Basel)*. 2024;13(3):339. DOI: 10.3390/plants13030339

Crespo-Herrera L.A., Garkava-Gustavsson L., Åhman I. A systematic review of rye (*Secale cereale* L.) as a source of resistance to pathogens and pests in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Hereditas*. 2017;154:14. DOI: 10.1186/s41065-017-0033-5

Current List of Wheats with Rye and Alien Introgression: [website]. Available from: https://rye-gene-map.de/rye-introgression [accessed Oct. 02, 2025].

Dorofeev V.F., Rudenko M.I., Filatenko A.A., Shitova I.P., Korneichuk V.I., Pokrovskaya N.F., Komarov V.I., Jarina G.N., Semenova L.V., Bareš I., Segnalova J., Vlakh M., Zadražil K., Maly J., Odehnal V., Lehman Chr. (comp.). The international COMECON list of descriptors for the genus *Triticum* L. Leningrad: VIR; 1984. [in Russian] (Международный классификатор СЭВ рода *Triticum* L. / сост. В.Ф. Дорофеев, М.И. Руденко, А.А. Филатенко, И.П. Шитова, В.А. Корнейчук, Н.Ф. Покровская, В.И. Комаров, Г.Н. Ярина, Л.В. Семенова, И. Бареш, Я. Сегналова, М. Влах, К. Задражил, Я. Малый, В. Одегнал, Х. Леманн. Ленинград: ВИР; 1984).

Finkner R.E., Hsi D.G.H., Ferguson D.B. Performance of winter wheat varieties under dryland and irrigated conditions, Plains Branch Station, 1959-1966. *Agricultural Experiment Station Bulletin – New Mexico State University*. 1967;524:2-9. Available from: https://nmwrri.nmsu.edu/footer_pages/nm-wrri-library-database-files/wrri-library-pdfs/wrrilibrary1/001171.pdf [accessed Oct. 02, 2025].

GRIS. Genetic Resources Information System for Wheat and Triticale: [website]. Available from: http://wheatpedigree.net/sort/show/11983 [accessed Oct. 02, 2025].

Han G., Yan H., Li L., An D. Advancing wheat breeding using rye: a key contribution to wheat breeding history. *Trends in Biotechnology*. 2025;43(9):2170-2183. DOI: 10.1016/j.tibtech.2025.03.008

Ji Y., Yang G., Li X., Wang H., Bao Y. Development and characterization of two wheat–rye introgression lines with resistance to stripe rust and powdery mildew. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024;25(21):11677. DOI: 10.3390/ijms252111677

Jiang J., Friebe B., Gill B.S. Chromosome painting of Amigo wheat. *Theoretical and Applied Genetics*. 1994;89(7-8):811-813. DOI: 10.1007/BF00224501

Kocjan A., Kwasniewska J., Szurman-Zubrzycka M. Understanding plant tolerance to aluminum: exploring mechanisms and perspectives. *Plant and Soil*. 2024;507(1):195-219. DOI: 10.1007/s11104-024-06745-0

Leitch A.R., Schwarzacher T., Jackson D., Leitch I.J. *In situ* hybridization: a practical guide. Oxford: BIOS Scientific; Royal Microscopical Society; 1994.

Leonova I.N. Influence of alien genetic material on the manifestation of agronomically important traits of common wheat (*T. aestivum* L.). *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2018;22(3):321-328. [in Russian] (Леонова И.Н. Влияние чужеродного генетического материала на проявление хозяйственно важных признаков мягкой пшеницы (*T. aestivum* L.). *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2018;22(3):321-328). DOI: 10.18699/VJ18.367

Merezhko A.F., Udachin R.A., Zuev E.V., Filatenko A.A. Serbin A.A., Lyapunova O.A., Kosov V.Yu., Kurkiev U.K., Okhotnikova T.V., Navruzbekov N.A., Boguslavskiy R.L., Abdulaeva A.K., Chikida N.N., Mitrofanova O.P., Potokina S.A. Replenishment, preservation in living form and study of the world collection of wheat, *Aegilops* and triticale: guidelines (Popolneniye, sokhraneniye v zhivom vide i izucheniye mirovoy kollektsii pshenitsy, egilopsa i tritikale: metodicheskiye ukazaniya). A.F. Merezhko (ed.). St. Petersburg: VIR; 1999. [in Russian] (Мережко А.Ф., Удачин Р.А., Зуев Е.В., Филатенко А.А., Сербин А.А., Лапунова О.А., Косов В.Ю., Куркиев У.К., Охотникова Т.В., Наврузбеков Н.А., Богуславский Р.Л., Абдулаева А.К., Чикида Н.Н., Митрофанова О.П., Потокина С.А. Пополнение, сохранение в живом виде и изучение мировой коллекции пшеницы, эгилопса и тритикале: методические указания / под ред. А.Ф. Мережко. Санкт-Петербург: ВИР; 1999).

Nelson L.A., Hammons R.H., Baenziger P.S. G73-24 winter wheat varieties. Historical Materials from University of Nebraska – Lincoln. Extension 755; 1973. Available from: https://digitalcommons.unl.edu/extensionhist/755 [accessed Oct. 02, 2025].

Ofoe R., Thomas R.H., Asiedu S.K., Wang-Pruski G., Fofana B., Abbey L. Aluminum in plant: Benefits, toxicity and tolerance mechanisms. *Frontiers in Plant Science*. 2023;13:1085998. DOI: 10.3389/fpls.2022.1085998

Plotnikova L.Ya., Knaub V.V. Exploitation of the genetic potential of *Thinopyrum* and *Agropyron* genera to protect wheat from diseases and environmental stresses. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2024;28(5):536-553. [in Russian] (Плотникова Л.Я., Кнауб В.В. Использование генетического потенциала родов *Thinopyrum* и *Agropyron* для защиты пшеницы от болезней и абиотических стрессов. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2024;28(5):536-553). DOI: 10.18699/vjgb-24-60

Ren T., Jiang Q., Sun Z., Ren Z., Tan F., Yang W. et al. Development and characterization of novel wheat–rye 1RS·1BL translocation lines with high resistance to *Puccibia striiformis* f. sp. *tritici*. *Phytopathology*. 2022;112(6):1310-1315. DOI: 10.1094/PHYTO-07-21-0313-R

Schmidt J.W. A plant breeder looks at the problem of distinguishing varieties. *Journal of Seed Technology*. 1978;3(2):57-60.

Scholz M., Pendinen G. The effect of homoeologous meiotic pairing in tetraploid *Hordeum bulbosum* L. × *H. vulgare* L. hybrids on alien introgressions in offspring. *Cytogenetic and Genome Research*. 2016;150(2):139-149. DOI: 10.1159/000455141

Scholz M., Ruge-Wehling B., Habekuss A., Schrader O., Pendinen G., Fischer K. et al. *Ryd4 (Hb)*: a novel resistance gene introgressed from *Hordeum bulbosum* into barley and conferring complete and dominant resistance to the barley yellow dwarf virus. *Theoretical and Applied Genetics*. 2009;119(5):837-849. DOI: 10.1007/s00122-009-1093-3

Sharma S., Bhat P.R., Ehdaie B., Timothy J.C., Lukaczewski A.J., Waines J.G. Integrated genetic map and genetic analysis of a region associated with root traits on the short arm of rye chromosome 1 in bread wheat. *Theoretical and Applied Genetics*. 2009;119(5):783-793. DOI: 10.1007/s00122-009-1088-0

Sivasamy M., Jayaprakash P., Vikas V.K., Bhardwaj S.C., Singh G.P., Tomar S.M.S., et al. Gene stewardship in developing improved Indian bread wheat cultivars and genetic stocks with low terminal disease value-A compendium. Part I: Introgression of leaf rust resistance genes. *Nilgiri Wheat News*. 2018;10(10):3-30.

Taylor G., Foy C. Mechanisms of aluminum tolerance in *Triticum aestivum* L. (wheat). I. Differential pH induced by winter cultivars in nutrient solutions. *American Journal of Botany*. 1985;72(5):695-701. DOI: 10.1002/j.1537-2197.1985.tb08327.x

Washington State Crop Improvement Association: [website]. Available from: https://washingtoncrop.com/documents/Archives-Wheat/Centurk-Lancer.pdf [accessed Jan. 20, 2025].

World Weather. Weather in Pushkin (Pogoda v Pushkine): [website]. [in Russian] (World Weather. Погода в Пушкине: [сайт]). URL: https://world-weather.ru/pogoda/russia/pushkin [дата обращения: 02.10.2025].

Yakovleva O.V. Aluminum resistance of malting barley. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021;182(4):126-131. [in Russian] (Яковлева О.В. Алюмоустойчивость пивоваренного ячменя. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2021;182(4):126-131). DOI: 10.30901/2227-8834-2021-4-126-131

Yakovleva O.V., Kapeshinskiy A.M., Kovaleva O.N. Aluminium toxic ions tolerance in cultivated and wild barley. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2009;165:51-54. [in Russian] (Яковлева О.В., Капешинский А.М., Ковалева О.Н. Устойчивость культурного и дикого ячменя к действию токсичных ионов алюминия. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2009;165:51-54).

Yakovleva O.V., Kovaleva O.N. Catalogue of the VIR global collection. Issue 824. Barley. Characteristics of barley samples for resistance to toxic aluminum ions ($H^+ + Al^{3+}$). St. Petersburg: VIR; 2015. [in Russian] (Яковлева О.В., Ковалева О.Н. Каталог мировой коллекции ВИР. Выпуск 824. Ячмень. Характеристика образцов ячменя по устойчивости к токсичным ионам алюминия ($H^+ + Al^{3+}$). Санкт-Петербург: ВИР; 2015).

Zaitsev G.N. Mathematical statistics in experimental botany (Matematicheskaya statistika v eksperimentalnoy botanike). Moscow: Nauka; 1984. [in Russian] (Зайцев Г.Н. Математическая статистика в экспериментальной ботанике. Москва: Наука; 1984).

Zhang P., Kynast R., Friebe B. Protocol for GISH genomic *in situ* hybridization. Manhattan, KS: Kansas State University; 2001. Available from: https://www.k-state.edu/wgrc/images/pdfs/GISH.pdf [accessed Oct. 02, 2025].

Информация об авторах

Ольга Павловна Митрофанова, 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, o.mitrofanova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-9171-2964

Анида Галиевна Хакимова, 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, a.hakimova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-0481-8462

Галина Ивановна Пендинен, 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, pendinen@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2814-7074

Ольга Владимировна Яковлева, 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, oly.yakovleva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6537-0868

Валентина Алексеевна Лосева, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Екатерининская опытная станция – филиал ВИР, 393023 Россия, Тамбовская область, Никифоровский район, с. Екатеринино, ул. Парковая, ekosvir@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-4716-3766

Information about the authors

Olga P. Mitrofanova, Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, o.mitrofanova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-9171-2964

Anida G. Khakimova, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, a.hakimova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-0481-8462

Galina I. Pendinen, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, pendinen@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2814-7074

Olga V. Yakovleva, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, oly.yakovleva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6537-0868

Valentina A. Loseva, Associate Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Yekaterinino Experiment Station – branch of VIR, Parkovaya St., Yekaterinino Village, Nikiforovsky Distict, Tambov Province 393023, Russia, ekosvir@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-4716-3766

Вклад авторов: Митрофанова О. П. – общее руководство; разработка концепции; проведение исследований; обобщение, анализ, интерпретация полученных данных; критическая доработка с целью улучшения содержания статьи; редактирование. Хакимова А. Г. – разработка концепции; проведение исследований, создание рекомбинантных линий (РЛ), их изучение в условиях Северо-Западного региона РФ; подготовка первоначального текста статьи. Пендинен Г. И. – цитогенетический анализ РЛ; подготовка первоначального текста статьи. Яковлева О. В. – оценка устойчивости РЛ к действию токсических ионов $Al3^{+}$; подготовка первоначального текста статьи. Лосева В. А. – оценка РЛ в условиях Центрально-Черноземного региона РФ; подготовка первоначального текста статьи.
Contribution of the authors: Mitrofanova O. P. – general supervision; concept development; research; summarizing, analyzing, and interpreting the obtained data; critical revision to improve the content of the article; editing. Khakimova A. G. – concept development, research, development of recombinant lines (RLs), their study under the conditions of the Northwestern Region of Russia; preparation of the initial text of the manuscript. Pendinen G. I. – cytogenetic analysis of the RLs; preparation of the initial text of the manuscript. Yakovleva O. V. – assessment of the RL resistance to the effect of toxic $Al3^{+}$ ions; preparation of the initial text of the manuscript. Loseva V. A. – assessment of the RLs under the conditions of the Central Black Earth Region of Russia; preparation of the initial text of the manuscript.

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

Статья поступила в редакцию 24.10.2025; одобрена после рецензирования 02.02.2026; принята к публикации 06.04.2026.
The article was submitted on 24.10.2025; approved after reviewing on 02.02.2026; accepted for publication on 06.04.2026.

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

Научная статья
УДК 633.853.52:631.522
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o13

CC BY

Разработка мультиплексных систем SSR-маркеров сои (*Glycine max* (L.) Merr.) для паспортизации и идентификации сортов

В. Г. Савиченко

Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В.С. Пустовойта, Краснодар, Россия

Автор, ответственный за переписку: Виолетта Георгиевна Савиченко, violet.savichenko@mail.ru

Актуальность. Соя (*Glycine max* (L.) Merr.) является стратегически значимой сельскохозяйственной культурой, расширение сортового разнообразия которой требует надежных и воспроизводимых методов идентификации и контроля в области семеноводства. Микросателлитные маркеры получили широкое применение для паспортизации и идентификации сортов, однако в целях повышения точности и производительности генотипирования требуется разработка мультиплексных систем на их основе.
Материалы и методы. Исследование проведено на образцах ДНК индивидуальных растений сои 15 сортов разного происхождения. Для 19 из 22 тринуклеотидных SSR-локусов с применением биоинформатических методов сконструированы новые пары праймеров, адаптированные для использования в мультиплексных ПЦР. Для экспериментальной проверки праймеры были модифицированы разными флуорофорами. Разделение ПЦР-продуктов осуществлялось с помощью фрагментного анализа с использованием капиллярного электрофореза. Оптимизация мультиплексных ПЦР включала подбор совместимых маркеров, соотношений концентраций праймеров и температурно-временных условий амплификации.
Результаты. Разработаны две мультиплексные системы, включающие 11 информативных SSR-маркеров в каждой. Оптимизация условий мультиплексных ПЦР обеспечила специфичную, стабильную и воспроизводимую амплификацию фрагментов ДНК соответствующих SSR-маркеров. Установлены диапазоны размеров аллельных вариантов и сформированы файлы панелей для корректной интерпретации результатов фрагментного анализа относительно контрольного образца.
Заключение. Разработанные мультиплексные системы SSR-маркеров повышают точность и сокращают продолжительность генотипирования, что определяет возможность их последующего применения в генетической паспортизации и идентификации сортов сои.

Ключевые слова: ДНК-маркеры, микросателлиты, генетический полиморфизм, генотипирование

Благодарности: исследование выполнено в рамках реализации государственного задания Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур имени В.С. Пустовойта № 082-3-2023-0001 «Разработка технологии генетической идентификации и паспортизации сортов сои с использованием системы маркеров микросателлитных локусов ДНК».
Автор благодарит С. А. Рамазанову и С. З. Гучетль за научное руководство.

Для цитирования: Савиченко В.Г. Разработка мультиплексных систем SSR-маркеров сои (*Glycine max* (L.) Merr.) для паспортизации и идентификации сортов. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(2):193-206. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o13

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.

© Савиченко В.Г., 2026

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

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o13

Development of multiplex SSR marker systems of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) for certification and identification of cultivars

Violetta G. Savichenko

V.S. Pustovoit All-Russia Research Institute of Oil Crops, Krasnodar, Russia

Corresponding author: Violetta G. Savichenko, violet.savichenko@mail.ru

Background. Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) is a strategically important crop, and expanding its cultivated diversity requires reliable and reproducible methods of identification and control in seed production. Microsatellite markers are widely used for certification and identification of cultivars, but to improve the accuracy and productivity of genotyping, it is necessary to develop multiplex systems on their basis.
Materials and methods. DNA samples from individual soybean plants of 15 cultivars of various origin were studied. As a marker base, we used 22 informative microsatellite loci with trinucleotide repeats distributed throughout the soybean genome. Using bioinformatic approaches, we designed new primer pairs for 19 loci, adapted for specific amplification of target DNA fragments under unified conditions of multiplex PCR. For experimental validation, forward primers were labeled with different fluorophores. When distributing fluorophores among SSR markers, we took into account the size ranges of amplified DNA fragments, thus avoiding signal overlap of different markers during the fragment analysis. PCR products were separated by capillary electrophoresis using a genetic analyzer. Optimization of multiplex PCR included stepwise selection of marker combinations, primer concentration ratios, and thermal cycling conditions.
Results. Two multiplex systems were developed, each including 11 informative SSR markers. The optimized multiplex PCR conditions ensured specific, stable, and reproducible amplification of DNA fragments corresponding to the loci. Based on the results, panel files were created in fragment analysis software and adjusted versus a positive control, which ensured correct interpretation and comparability of results between analytical runs.
Conclusion. The developed multiplex SSR marker systems improve genotyping accuracy and reduce its duration, thereby enabling their application in genetic certification and identification of soybean cultivars.

Keywords: DNA markers, microsatellites, genetic polymorphism, genotyping

Acknowledgments: the research was carried out within the framework of the state task assigned to the V.S. Pustovoit All-Russia Research Institute of Oil Crops, Project No. 082-3-2023-0001 “Development of a technology for genetic identification and certification of soybean cultivars using a system of DNA microsatellite loci markers”.
The author is grateful to S. A. Ramazanova and S. Z. Guchetl for scientific supervision.

For citation: Savichenko V.G. Development of multiplex SSR marker systems of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) for certification and identification of cultivars. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(2):193-206. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o13

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

Соя (*Glycine max* (L.) Merr.) является стратегически значимой культурой в обеспечении продовольственной безопасности страны. В связи с постоянно расширяемым сортиментом сортов сои требуется надежный инструмент для определения оригинальности сортов, защиты интеллектуальных прав селекционеров и контроля подлинности семенного материала. В настоящее время в качестве такого инструмента рассматривается генетическая паспортизация (ДНК-паспортизация), что делает ее особенно актуальной в условиях ужесточения требований в области семеноводства. Несмотря на многочисленные исследования, подтверждающие целесообразность применения ДНК-маркеров для паспортизации и идентификации сельскохозяйственных растений, на сегодняшний день нет стандартизированных методик для их практического применения (Khlestkina et al., 2025).

Микросателлиты, известные также как SSR (Simple Sequence Repeats) – локусы ДНК, содержащие повторяющиеся последовательности (мотивы) длиной от 1 до 10 нуклеотидов. Данные локусы имеют высокий уровень полиморфизма, заключающийся в разнице количества мотивов, что позволяет формировать уникальный ДНК-профиль для разных генотипов. К преимуществам SSR-маркеров также относят кодоминантный тип наследования, воспроизводимость результатов анализа и относительную простоту детекции. Эти характеристики обеспечили широкое распространение микросателлитных маркеров для идентификации различных генотипов (Alves et al., 2024).

Успешное применение SSR-маркеров для ДНК-идентификации сортов сои было продемонстрировано в работах зарубежных (Tripathi et al., 2023; Zatybekov et al., 2023) и отечественных исследователей (Bondarenko et al., 2025). Однако в большинстве из них SSR-анализ проводят в моноплексных ПЦР, где в каждой реакции используется только одна пара праймеров. Разделение продуктов амплификации осуществляют методами электрофореза в агарозных или полиакриламидных гелях различной концентрации. Несмотря на простоту и доступность проведения, такой анализ является довольно трудоемким и продолжительным, особенно при большом количестве используемых ДНК-маркеров и анализируемых образцов. При этом из-за низкой разрешающей способности и специфики проведения данных методов электрофореза точность анализа остается недостаточно высокой, что создает проблемы при идентификации генотипов, отличающихся всего несколькими парами нуклеотидов (Guchetl et al., 2025).

На современном этапе развития молекулярно-генетических методов наблюдается тенденция к переходу на мультиплексные системы ДНК-маркеров, когда в ходе одной полимеразной цепной реакции происходит одновременная амплификация с использованием двух и более пар праймеров (Zubov et al., 2024). Такой подход позволяет значительно сократить трудовые и временные затраты, а в сочетании с капиллярным электрофорезом повысить точность, воспроизводимость и производительность генотипирования. Мультиплексные системы с последующим разделением амплифицированных фрагментов методом капиллярного электрофореза эффективно применяются для идентификации линий, сортов и гибридов сельскохозяйственных культур. Так, например, для паспортизации сортов картофеля была разработана мультиплексная система, включающая 10 SSR-маркеров (Kolobova et al., 2017). Для подсолнечника разными исследователями созданы мультиплексные наборы из 7 маркеров (Shilov et al., 2023), 4 набора из 4–5 маркеров (Golovatskaya, Guchetl, 2024). Для кукурузы (Koltun et al., 2024) были протестированы 2 набора по 10 SSR-маркеров. Эти примеры показывают высокий интерес к созданию эффективных способов генотипирования, а также применимость мультиплексного подхода для идентификации генотипов различных сельскохозяйственных культур.

Генотипирование сортов сои также проводят с помощью мультиплексных систем ДНК-маркеров. В исследовании (Li et al., 2024) использовали 20 мультиплексных систем, содержащих по 3–4 SSR-маркера. Такое большое общее количество SSR-маркеров, но малое в составе мультиплексных ПЦР для идентификации сортов, может быть избыточным и экономически нецелесообразным из-за высокой стоимости анализа большого числа образцов. Работы в данном направлении ведутся и в РФ – описаны два мультиплексных набора, состоящих из 8 и 7 SSR-маркеров соответственно (Divashuk et al., 2025), что показывает высокий интерес к созданию мультиплексных систем на сое и его актуальность.

В наших предыдущих исследованиях было показано, что сорта сои характеризуются внутрисортовым полиморфизмом и представлены совокупностью биотипов с различной частотой встречаемости. При этом некоторые сорта имеют в своей структуре идентичные биотипы, но отличаются друг от друга наличием уникальных (Savichenko et al., 2024b). Этим обусловлена необходимость анализа выборок индивидуальных растений сорта для учета состава биотипов с целью формирования информативных ДНК-профилей сортов при их паспортизации и идентификации. Это повышает требования к производительности и воспроизводимости способов генотипирования и также подтверждает актуальность разработки мультиплексных систем ДНК-маркеров для сокращения времени и стоимости анализа.

Настоящее исследование основано на ранее проведенных нами работах, в которых были отобраны информативные SSR-маркеры, потенциально пригодные для паспортизации и идентификации сортов сои (Ramazanova, Kolomytseva, 2020; Ramazanova et al., 2021; Savichenko et al., 2024a).

Цель исследования – разработать мультиплексные системы на основе ранее отобранных SSR-локусов, обеспечивающие возможность их применения при паспортизации и идентификации сортов сои.

Материалы и методы

Исследования проводили в 2024–2025 гг. в лаборатории молекулярно-генетических исследований Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур имени В.С. Пустовойта (ВНИИМК). Материалом для оценки разрабатываемых мультиплексных систем служили образцы ДНК, выделенные из одного растения (семени) сои каждого из 15 сортов: ‘Williams 82’, ‘Ходсон’ (США); СибНИИК-315 (Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, РФ); ‘Оптима’, ‘Уника’ (ООО «Соевый комплекс», РФ); ‘Омская 4’, ‘Сибириада’ (Омский аграрный научный центр, РФ); ‘Лидия’, ‘Даурия’ (Всероссийский НИИ сои, РФ); ‘Весточка’, ‘Зара’, ‘Кубань’, ‘Кубанская 4958’, ‘Лира’, ‘Пума’ (ВНИИМК, РФ). Сорт ‘Лира’ выбран в качестве положительного контрольного образца (ПКО) для сопоставления результатов меж-

ду сериями анализов, как характеризующийся низким уровнем внутрисортового полиморфизма (Savichenko et al., 2024b).

Выделение ДНК осуществлялось из осевых органов зародыша, предварительно вырезанных из семени с помощью скальпеля и измельченных в гомогенизаторе KZ-III-FP (Servicebio, КНР). Для выделения и очистки ДНК использовали набор реагентов «МагноПрайм ФИТО» («НекстБио», РФ) на автоматической станции Auto-Pure 96 (Allsheng, КНР). Концентрацию выделенной ДНК измеряли на спектрофотометре Micro Spectrophotometer Nano-300 (Allsheng, КНР), при необходимости образцы разбавляли деионизированной водой до требуемой концентрации (25 нг/мкл).

Исходный набор SSR-локусов, распределенных по всему геному сои, формировали на основании данных об их информативности (Ramazanova, Kolomytseva, 2020; Ramazanova et al., 2021; Savichenko et al., 2024a). Критериями включения локусов в набор для дальнейшей работы являлись стабильность амплификации, отсутствие нулевых аллелей и возможность однозначной интерпретации аллельных вариантов. Разработка мультиплексных систем осуществлялась на основе 22 SSR-локусов с тринуклеотидными мотивами, локализованных на соответствующих хромосомах: 1 – Satt532 и Satt507; 2 – Satt141; 3 – Satt549; 4 – AW277661; 6 – Satt286 и Satt681; 7 – CSSR531; 9 – Soyprp1; 11 – Satt359 и Satt197; 12 – Satt353, Satt181 и Satt442; 13 – Satt149; 14 – Satt168; 15 – Satt263; 16 – Satt287 и Satt596; 18 – Satt309; 20 – Satt292 и Satt614, представленных в базе данных SoyBase (https://soybase.org). Конструирование новых последовательностей праймеров осуществлялось с помощью инструмента Primer-BLAST (https://www.ncbi.nlm.nih.gov/tools/primer-blast) на основе последовательностей ДНК референсного генома сои сорта 'Williams 82' (сборка Glycine_max_v4.0, размещенная в базе данных RefSeq на платформе NCBI, https://www.ncbi.nlm.nih.gov/datasets/genome/GCF_000004515.6/), содержащих микросателлитный участок и по 200–250 пн фланкирующих областей. Параметрами для конструирования были: место посадки прямого и обратного праймеров в областях, фланкирующих микросателлит, ожидаемый размер амплифицируемого фрагмента 100–550 пн, температура плавления (Tm) праймеров 58–62°C (с максимально допустимой разницей между парой 3°C). Критерии для отбора праймерных пар *in silico*: амплификация только специфичного продукта, отсутствие или минимально возможное образование димеров. Для экспериментальной проверки праймеры были синтезированы с флуорофорами FAM, R6G, TAMRA или ROX на 5`-конце прямых (F) праймеров.

Моноплексные ПЦР проводились в реакционных смесях объемом 10 мкл, содержащих: по 1 мкл 10х ПЦР-буфера-Б, $MgCl_2$ (25 мМ) и смеси дНТФ (концентрация каждого – 50 мкМ); 0,2 мкл SynTaq ДНК-полимеразы (5 е. а./мкл) производства «Синтол» (РФ); по 0,04 мкл прямого и обратного праймера (100 пкМ/мкл); 2 мкл ДНК (25 нг/мкл) и деионизированную воду до конечного объема. Амплификация осуществлялась в термоциклере GeneExplorer GE-48D (Bioer, КНР) по следующим температурно-временным режимам: начальная денатурация при 95°C в течение 90 с; затем 35 циклов: денатурация при 95°C – 30 с, отжиг при 60°C – 40 с, элонгация при 70°C – 60 с; финальная элонгация при 70°C – 2 мин.

Мультиплексные ПЦР проводились в реакционных смесях аналогичного состава, за исключением увеличенного числа праймерных пар. При формировании мультиплексных наборов концентрация каждого вносимого праймера составляла 4 пкМ/мкл, что соответствует конечной концентрации в реакции 0,4 пкМ/мкл. Амплификация проводилась по двум разным протоколам температурно-временных режимов. *Протокол А* (touchdown) – начальная денатурация при 95°C в течение 90 с; далее 10 циклов: денатурация при 95°C – 30 с, отжиг при 64°C (с понижением температуры на 0,5°C с каждым циклом) – 40 с, элонгация при 70°C – 60 с; затем 25 циклов: 95°C – 30 с, 58°C – 40 с, 70°C – 60 с; финальная элонгация при 70°C – 2 мин. *Протокол Б* (two-step PCR) – начальная денатурация при 95°C – 2 мин; затем 35 циклов: денатурация при 95°C – 5 с, отжиг-элонгация при 62°C – 90 с; финальная элонгация при 65°C – 30 мин. Для сравнения эффективности амплификации по двум протоколам ПЦР проводили в реакционных смесях, взятых из предварительно приготовленного общего стока, с целью исключения влияния факторов, не связанных с температурно-временными режимами (погрешности дозирования компонентов); амплификация осуществлялась одновременно в разных температурных блоках одного термоциклера GeneExplorer GE-48D. Выбор оптимального протокола основывался на сравнительном анализе получаемых электрофореграмм.

При оптимизации состава реакционной смеси мультиплексной ПЦР концентрации праймеров регулировали путем варьирования объема вносимого исходного раствора праймера (100 пкМ/мкл). Для SSR-маркеров с низкой интенсивностью сигнала концентрацию увеличивали, для остальных оставляли неизменной или снижали. Итоговые концентрации каждой пары праймеров устанавливались после перераспределения флуорофоров с учетом различий в интенсивности их флуоресценции. Критерием для оценки различных вариантов концентраций праймеров являлась относительная интенсивность сигнала.

Разделение продуктов амплификации (ПЦР-продуктов) осуществлялось с помощью фрагментного анализа, выполненного методом капиллярного электрофореза на генетическом анализаторе «Нанофор 05» (Институт аналитического приборостроения – ИАП РАН, РФ). Подготовка проб для капиллярного электрофореза включала смешивание 1 мкл ПЦР-продукта мультиплексной реакции (или 1 мкл из предварительно смешанных ПЦР-продуктов моноплексных реакций с праймерами, меченными разными флуорофорами) с 0,5 мкл размерного стандарта СД-600 и 8,5 мкл деионизированного HiDi-формамида («Синтол», РФ), последующую денатурацию при 95°C в течение 3 мин, затем охлаждение до 0°C в термоциклере GeneExplorer GE-48D. Параметры электрофореза устанавливались стандартные для линейки капилляров длиной 36 см (ИАП РАН, РФ) и полимера ПДМА-4 («Синтол», РФ). Размер фрагментов ДНК определяли относительно размерного стандарта СД-600 с помощью компьютерного программного обеспечения GeneMarker версии 3.0.1 (SoftGenetics, США).

Все опыты, включающие проведение ПЦР и фрагментный анализ, проводились в 3-кратной технической повторности, используя при этом одни и те же образцы ДНК, что позволило оценить стабильность и воспроизводимость работы используемых SSR-маркеров.

Дополнительно в GeneMarker формировали файлы панелей аллелей SSR-маркеров. При создании панелей аллели каждого маркера определяли по положению пиков анализируемых образцов на электрофореграмме, а также статтер-пиков, соответствующих потенциаль-

ным аллельным вариантам, возможным при увеличении выборки генотипов. Обозначение аллелей задавали с учетом размеров соответствующих фрагментов референсного генома сои, установленных *in silico* (с помощью Primer-BLAST), с шагом 3 пн, что обусловлено тринуклеотидным мотивом используемых SSR-маркеров.

Результаты и обсуждение

Совместная амплификация нескольких SSR-маркеров в мультиплексных ПЦР ограничивается рядом факторов, включая различия в температуре отжига праймеров, что было показано в наших предыдущих исследованиях (Ramazanova et al., 2021; Savichenko et al., 2024a), образование неспецифичных продуктов амплификации за счет перекрестного взаимодействия праймеров, формирование праймерных димеров. В связи с чем первоначальным этапом исследования стало устранение перечисленных ограничений несовместимости праймеров. Для решения данной проблемы к 19 из 22 SSR-локусов (за исключением Satt532, Satt507 и Satt168) были сконструированы и отобраны новые последовательности праймеров. С учетом ожидаемых размеров амплифицируемых фрагментов ДНК к праймерам были подобраны флуорофоры таким образом, чтобы при совместном использовании маркеров с близкими значениями размеров фрагментов на электрофореграммах капиллярного электрофореза пики одного маркера не перекрывались пиками другого (табл. 1).

Далее каждую пару праймеров протестировали отдельно в идентичных условиях. Использование для анализа образцов ДНК индивидуальных растений позволило четко интерпретировать специфичность амплификации. Это обусловлено тем, что для одного микросателлитного локуса у индивидуального растения ожидается не более двух аллельных вариантов – один у гомозиготных и два у гетерозиготных генотипов (кодоминантный тип наследования). Учитывая палеополиплоидное происхождение генома сои (*G. max*), появление большего количества пиков на электрофореграмме может свидетельствовать об амплификации паралогичных или неспецифических последовательностей.

В результате моноплексных ПЦР с использованием новых пар праймеров по всем SSR-маркерам получены только целевые фрагменты ДНК, размеры которых были близки по значениям к ожидаемым (рассчитанным по референсному геному сои). Для локуса Satt141 установлено, что применение пары праймеров, представленной в SoyBase, приводило к амплификации дополнительного продукта размером 134 пн, воспроизводимо наблюдаемого у образцов, имеющих фрагмент 146 пн. Указанный продукт интерпретировался как второй аллель, что приводило к ошибочной идентификации образцов как гетерозиготных по SSR-маркеру Satt141. При использовании новой сконструированной нами пары праймеров дополнительный фрагмент у тех же образцов не выявлялся. При этом остальные аллели SSR-маркера Satt141 сохранялись, за исключением изменения их размера, что обу-

Таблица 1. Характеристика новых праймеров, фланкирующих SSR-локусы сои
Table 1. Characteristics of the new primers flanking SSR loci in soybean

SSR-локус	Нуклеотидные последовательности праймеров	Tm, °C	Ожидаемый размер фрагмента ДНК, пн	Флуорофор
Satt141	F: ACACGATCAGGACTCTTTCGT	59	331	R6G
	R: GCCGTCATAAAAAGTCCCTCAGA	61		–
Satt549	F: CGCAACAATCACTAGTACGGG	59	314	FAM
	R: CCAGCAGGCCCAAGGTTTAT	60		-
AW277661	F: CCCGAAAGAAAGACAGAAAACCC	60	275	R6G
	R: ATATGAAAGTAGGTGACCATGGAGC	60		–
Satt681	F: GGACCCTCGTGGAAACCTAC	60	333	FAM
	R: ATATTGCATGTAACCAAAGTCCCTCT	60		–
Satt286	F: TGGCATGGTATCCTTGCTACATA	59	466	R6G
	R: TCATCTTGTTTGGAGGGAATAGC	59		–
CSSR531	F: GTGTGAAATGGCTAACCCGC	60	120	TAMRA
	R: GGCCATGCACCTGCTACTT	60		–
Soyprp1	F: AGATCGAAGAGGTACGTGCCAA	62	387	FAM
	R: ATGGCTGCCAGCTGCATATT	61		–
Satt197	F: AAATTGACAACCGAAGAATTACGTG	59	190	ROX
	R: GCCACCTAATCCAATGGGCA	60		–
Satt359	F: TGATCATTGACTACTCGAATGTGAT	58	348	FAM
	R: TCTCAAATCCAAGCTGCCGT	60		–

Таблица 1. Окончание
Table 1. The end

SSR-локус	Нуклеотидные последовательности праймеров	Tm, °C	Ожидаемый размер фрагмента ДНК, пн	Флуорофор
Satt353	F: ATACACGCATTGCCTTTCCTG	59	248	ROX
	R: GCTCAAAAGCCTATCTTAACCAAA	58		–
Satt181	F: ACTAGCCAAGGGAGAGAGGAG	60	373	R6G
	R: CCCAACAAAAATTTGAACCCCGT	61		–
Satt442	F: ACCTGGACTTGTTTGCTCATCA	60	207	TAMRA
	R: GCGTGTAATTATGCATTCGAGTGTT	61		–
Satt149	F: GCTACAGTCACAGTACTTACCCTTT	60	422	FAM
	R: CGAGTTGGAGGCCATAGTCAC	61		–
Satt263	F: TGCACCCAATCATGATAGCATTT	59	329	TAMRA
	R: ATATGGTCTTAAGAGACCGACCCA	60		–
Satt287	F: GCCAATTCCATTGTGTGTCAG	58	390	ROX
	R: GGTTTGTTCAGTGGTGGGAGA	60		–
Satt596	F: CCGTCGATTCCGTACAAGATAG	59	255	FAM
	R: CCCTTCGTCCACCAAATATTCAA	59		–
Satt309	F: TCGAGTCCTTCAAATTGGCGT	60	276	ROX
	R: GGCTAGATTCAAGAAACAAAAGGT	58		–
Satt292	F: AAGGCTAACTTCTTTGGGTTGAGA	60	321	ROX
	R: GAAGGCCAACATTGAAAAGTCGT	60		–
Satt614	F: ACCCAATCATAAGTTTCTCCCCT	59	466	TAMRA
	R: TGAGCTCAACTGAGTCACGTC	60		–
Satt532	F: GCGCCAATATTATCATGCTTTATGT	59	168	ROX
	R: GCGTGTAAAAATCTTTGAATCTTGA	57		–
Satt507	F: GCGCTCAGCCTTGTTAAATCACTT	62	217	FAM
	R: GCGCTACTCTCGTGTCGTTAGTTA	62		–
Satt168	F: CGCTTGCCCAAAAATTAATAGTA	56	226	TAMRA
	R: CCATTCTCCAACCTCAATCTTATAT	57		–

Примечание: F – прямой праймер; R – обратный праймер; Tm – температура плавления праймера, значение из Primer-BLAST (https://www.ncbi.nlm.nih.gov/tools/primer-blast)

Note: F – forward primer; R – reverse primer; Tm – primer melting temperatures, the value supplied from Primer-BLAST (https://www.ncbi.nlm.nih.gov/tools/primer-blast)

словлено смещением положения праймеров в последовательности, фланкирующей микросателлит. Наблюдаемый эффект указывает на некорректную работу праймеров, использованных ранее (из SoyBase). На рисунке 1 представлены результаты амплификации фрагментов по SSR-маркеру Satt141 с применением разных пар праймеров на примере образца ДНК растения сорта 'Уника'.

Таким образом, конструирование новых пар праймеров привело температуры отжига к идентичным значениям и обеспечило специфичную амплификацию целевых фрагментов ДНК, что создало возможность для последующего объединения праймеров в мультиплексные ПЦР.

На выборке анализируемых образцов для каждого SSR-маркера были установлены фактические размеры амплифицированных фрагментов ДНК и диапазоны их значений. В таблице 2 SSR-маркеры сгруппированы в два блока в соответствии с их дальнейшим распределением в мультиплексных системах.

Полученные аллельные варианты по всем SSR-маркерам (см. табл. 2) представляют собой ДНК-профили, уникальные для анализируемых образцов. Следует отме-

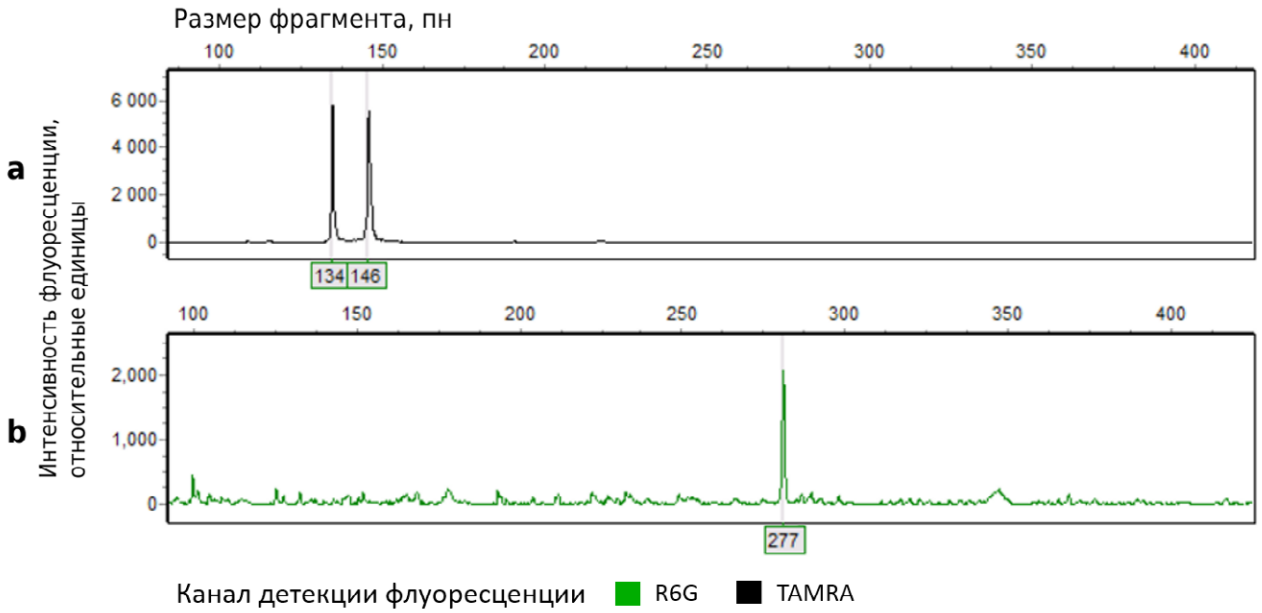


Рис. 1. Электрофореграммы разделения ПЦР-продукта SSR-маркера Satt141 (растение сорта 'Уника'):
a – с праймерами, представленными в SoyBase; **b** – с новыми праймерами

Fig. 1. Electrophoregrams of PCR product separation for the SSR marker Satt141 (a plant of cv. 'Unika'):
a – with primers from SoyBase; **b** – with the newly designed primers

Таблица 2. Размеры фрагментов ДНК, соответствующих SSR-маркерам, у сортов сои, пн

Table 2. Sizes of DNA fragments corresponding to SSR markers in soybean cultivars, bp

Сорт	SSR-маркер										
	Satt507	Satt681	Satt149	Satt532	Satt141	Satt614	Satt442	Satt263	Satt309	Satt359	Satt286
'Лира'*	211	333	407	165	319	433	192	338	261	348	466
'Williams 82'	211	333	422	168	331	472	207	329	276	348	466
'Ходсон'	208	333	398	165	322	421	192	329	261	354	466
'СибНИИК-315'	211	333	398	168	319	415	207	308	261	354	466
'Оптима'	208	333	398	165	319	481	192	308	261	354	466
'Уника'	211	333	407	162	277	415	207	311	261	372	466
'Омская 4'	214	333	398	168	322	481	195	314	261	375	460
'Сибириада'	214	333	398	168	322	433	192	314	261	375	460
'Даурия'	214	327/330	398	165	322	421	195	338	255	375	466
'Лидия'	214	327	425	165	322	421	192	314	261	372	460
'Весточка'	208	333	398	165	328	472	204	329	261	354	451
'Зара'	208	333	398	165	328	472	204	329	261	354	451
'Кубань'	208	345	422	174	322	454	189	311	261	348	460
'Кубанская 4958'	208/211	333	398	165	322	421/433	189	308/329	261	354	466
'Пума'	208	333	398	165	319	454	198	308	261	354	457
Диапазон значений	208–214	327–345	398–425	162–174	277–331	415–481	189–207	308–338	255–276	348–375	451–466

Таблица 2. Окончание
Table 2. The end

Сорт	SSR-маркер										
	CSSR531	Satt596	Satt287	Satt197	AW277661	Satt181	Satt168	Satt549	Satt353	Satt292	Soyprp1
‘Лира’*	111	237	360	202	275	364	199	299	251	336	360
‘Williams 82’	114	252	390	190	275	361/373	199/226	314	251	321	387
‘Ходсон’	111	255	390	205	257	331	229	299	251	294	390
‘СибНИИК-315’	117	246	360	205	275	364	229	290	251	336	390
‘Оптима’	111	282	390	205	260	331	199	314	251	336	360
‘Уника’	111	246	360	205	275	364	229	314	236	336	360
‘Омская 4’	114	240	360	205	275	331	229	299	251	294	387
‘Сибириада’	114	282	360	205	260	331	229	299	251	339	387
‘Даурия’	114	249	360	205	275	355	229	299	236	321	390
‘Лидия’	114	252	360	199	257	331	199	299	251	294	387
‘Весточка’	114	240	390	205	260	331	211	314	236	264	387
‘Зара’	111	240	390	205	260	331	211	314	236	294	387
‘Кубань’	96	240	360	202	257	331	229	314	236	336	360
‘Кубанская 4958’	111	255	390	205	260	331/364	229	314	251	336	360/387
‘Пума’	117	246	390	190	275	331	226	299	254	336	390
Диапазон значений	96–117	237–282	360–390	190–205	257–275	331–373	199–229	290–314	236–254	264–339	360–390

Примечание: * – ПКО; размеры фрагментов использовались как контрольные для сопоставления результатов при разных постановках анализа

Note: * – positive control; fragment sizes were used as reference values for comparison of results across different analytical runs

тить, что данные профили отражают генотипы отдельных растений, а не сорта в целом, и не могут рассматриваться как их полная характеристика ввиду возможного внутрисортового полиморфизма, для определения которого необходим анализ выборки растений сорта. По этой же причине в рамках настоящего исследования не проводился анализ генетического разнообразия сортов, включающий расчет статистических показателей.

Следующим этапом работы стало формирование мультиплексных систем, заключающееся в поэтапном пополнении наборов SSR-маркеров по результатам успешной амплификации при их совместном использовании. В результате проведенной работы были сформированы две мультиплексные системы, позволяющие проводить одновременную совместную амплификацию фрагментов 11 SSR-маркеров в каждой (см. табл. 2).

При проведении мультиплексных ПЦР со сформированными наборами SSR-маркеров амплифицировались фрагменты ДНК, размеры которых полностью соответствовали значениям, установленным в результате моноплексных ПЦР (см. табл. 2). Однако амплификация характеризовалась недостаточной стабильностью: при повторных постановках мультиплексных ПЦР наблюдалась вариабельность интенсивности сигнала по отдельным SSR-маркерам, а также появление неспецифичных продуктов реакции.

С целью получения стабильных и воспроизводимых результатов амплификации провели оптимизацию температурно-временных условий мультиплексных ПЦР. При сравнении двух отличающихся условиями протоколов было установлено, что оба обеспечивают амплификацию фрагментов по всем SSR-маркерам мультиплексной системы 1. Однако использование *протокола А* привело к появлению неспецифичных продуктов, что видно на каналах детекции флуоресценции FAM и R6G, тогда как по *протоколу Б* они отсутствуют (рис. 2). При этом в обоих случаях наблюдался слабый сигнал по SSR-маркерам Satt263 и Satt614.

Во второй мультиплексной системе при амплификации по *протоколу А* также отмечалось наличие неспецифичных продуктов по каналам детекции FAM и R6G. Интенсивность сигналов по SSR-маркерам Satt549, Satt181, Satt168, CSSR531, Satt197, Satt353, Satt292 и Satt287 была слабой, а для части анализируемых образцов ДНК вовсе отсутствовала. Проведение мультиплексной ПЦР по *протоколу Б* обеспечило стабильную амплификацию только целевых фрагментов ДНК по всем SSR-маркерам (рис. 3).

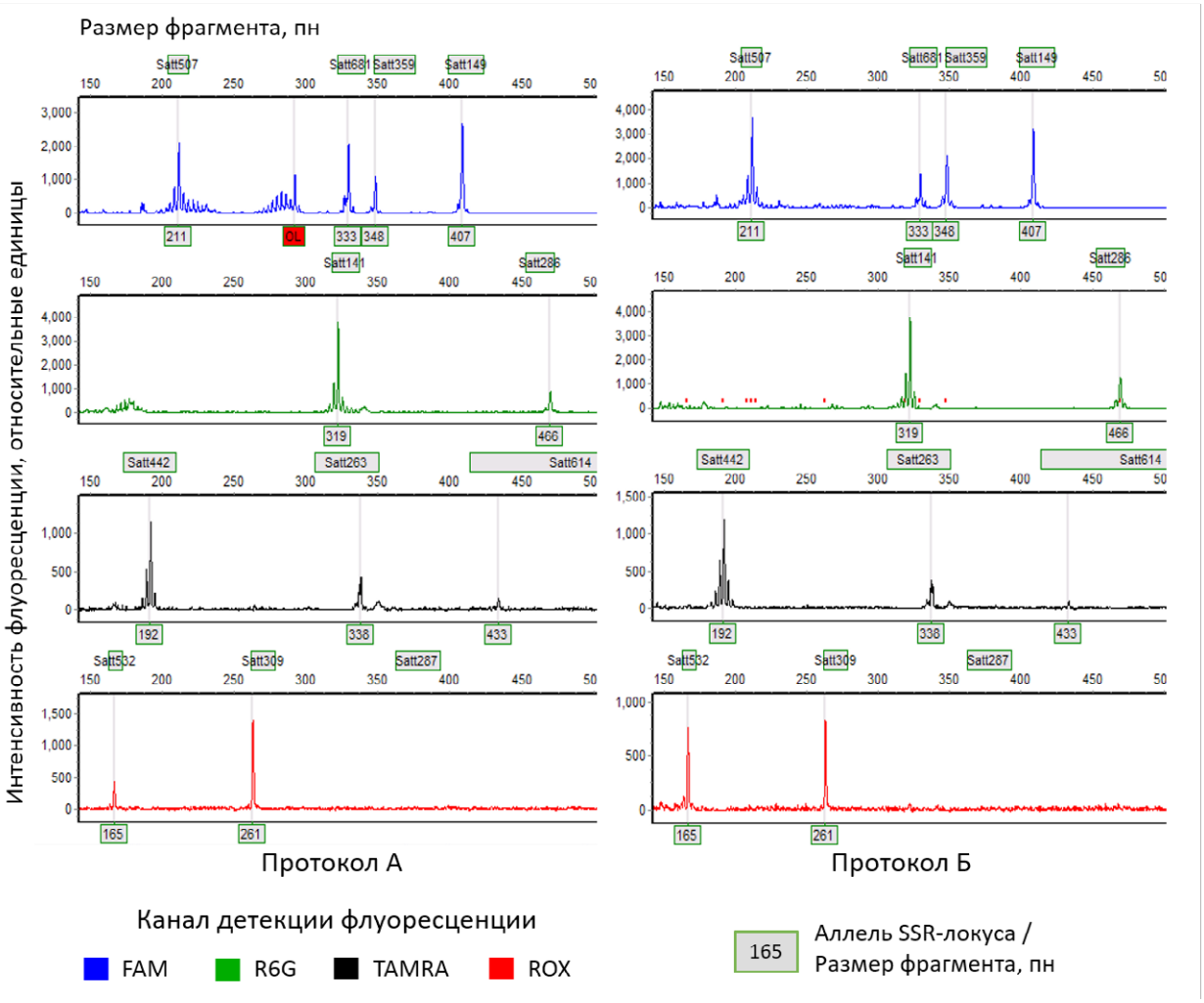


Рис. 2. Электрофореграммы разделения ПЦР-продуктов мультиплексной системы 1, полученных при разных протоколах амплификации (растение сорта 'Лира')

Fig. 2. Electrophoregrams of PCR product separation in multiplex system 1, obtained with different amplification protocols (a plant of cv. 'Lira')

В целом проведенный опыт показал преимущество протокола 2-шаговой ПЦР (*протокол Б*) для получения стабильных результатов амплификации при совместном использовании SSR-маркеров, поэтому данный протокол температурно-временных режимов был выбран в качестве оптимального для разработанных мультиплексных систем.

Однако, как уже было отмечено выше, для отдельных SSR-маркеров сохранялась относительно низкая интенсивность сигнала (см. рис. 2), что могло вызывать затруднение при интерпретации результатов фрагментного анализа. Описанная проблема наблюдалась при использовании одинаковых концентраций всех праймеров в мультиплексной ПЦР (0,4 пкМ/мкл). Поэтому было необходимо оптимизировать состав реакционной смеси. На рисунке 4 представлены электрофореграммы по каналу детекции флуоресценции TAMRA, демонстрирующие вариабельность интенсивности сигналов SSR-маркеров при различных соотношениях подбираемых концентраций праймеров.

Сопоставление высоты пиков SSR-маркеров показало различия между анализируемыми вариантами. Так, при одинаковой концентрации всех вносимых в реакционную смесь праймеров наблюдался слабый сигнал по SSR-маркерам Satt263 и Satt614 (вариант 1). При увеличении концентрации этих пар праймеров до 8 пкМ/мкл обнаружено повышение интенсивности сигнала по маркеру Satt263 (высота пика выше относительно предыдущего варианта), однако по SSR-маркеру Satt614 сигнал почти отсутствует (вариант 2). В варианте 3 не происходило амплификации по SSR-маркеру Satt263, при этом несколько выше предыдущего варианта был сигнал Satt614. Лучшим из анализируемых оказался вариант 4. При таком соотношении концентраций праймеров получены самые высокие пики SSR-маркеров Satt263 и Satt614 относительно других вариантов. Пики остальных SSR-маркеров воспроизводились с достаточной для интерпретации интенсивностью во всех вариантах. Однако сигнал маркера Satt614 сохранялся на низком уровне даже после оптимизации концентраций.

Известно, что интенсивность сигнала флуоресценции фрагментов ДНК при прочих равных условиях зависит от флуорофора, которым мечен праймер, и изменяется от большего к меньшему в следующем ряду: FAM, R6G, TAMRA, ROX (Modorov et al., 2024). Следовательно, добиться повышения сигнала можно изменением флуорофора на более интенсивный по уровню флуоресценции. Кроме того, перераспределение флуорофоров решает потенциальную проблему перекрывания диапазонов размеров фрагментов ДНК разных SSR-маркеров. Так, напри-

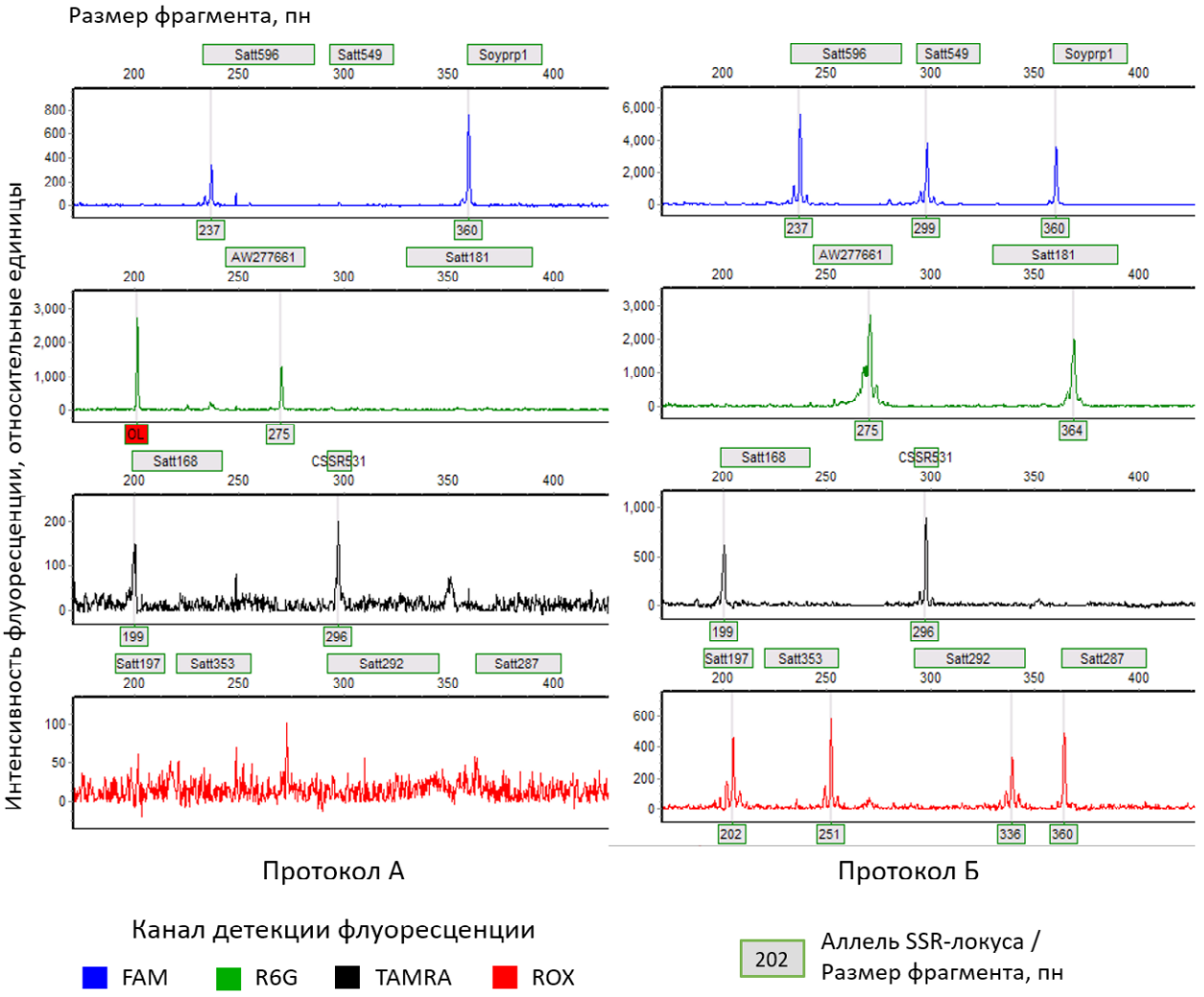


Рис. 3. Электрофореграммы разделения ПЦР-продуктов мультиплексной системы 2, полученных при разных протоколах амплификации (растение сорта 'Лира')

Fig. 3. Electrophoregrams of PCR product separation in multiplex system 2, obtained with different amplification protocols (a plant of cv. 'Lira')

мер, в мультиплексной системе 1 у маркеров Satt681 и Satt359, меченных одним флуорофором (FAM), диапазоны размеров отличаются всего на 3 пн, а в мультиплексной системе 2 довольно близкие диапазоны с разницей в 8 пн имеют SSR-маркеры Satt596 и Satt549, меченные FAM (см. табл. 2). В случае появления новых аллельных вариантов при расширении выборки анализируемых генотипов сои возможно наложение пиков одного маркера на пики другого и, как следствие, ошибочная интерпретация результатов анализа. В связи с этим флуорофоры между SSR-маркерами были перераспределены, что, в свою очередь, потребовало создания новых последовательностей праймеров к локусу CSSR531 для изменения размеров амплифицируемых ими фрагментов ДНК (в таблице 1 представлены актуальные последовательности).

Перераспределение флуорофоров, как и ожидалось, привело к изменению интенсивности сигналов. Соответственно, концентрации праймеров, подобранные выше, требовали корректировки. Итоговые значения концентраций праймеров и распределение между ними флуорофоров указаны в таблице 3.

Кроме того, изменение флуорофоров для SSR-маркеров привело к смещению определяемых размеров амплифицируемых фрагментов. Так, при сравнении результатов фрагментного анализа ПКО (ДНК растения сорта 'Лира') по одному и тому же SSR-маркеру Satt359, меченному разными флуорофорами (FAM и ROX), различие в определяемых размерах составляло 4 пн. В целом размер фрагмента является относительной величиной и может варьировать в зависимости от условий проведения фрагментного анализа (параметры электрофореза, длина капилляров, тип полимера, флуорофор). Для практического применения разработанных мультиплексных систем SSR-маркеров в целях паспортизации и идентификации генотипов принципиальное значение имеет воспроизводимость определения аллельных вариантов, основанная на корректности интерпретации размеров амплифицируемых фрагментов. В связи с этим в программе GeneMarker для обеих мультиплексных систем дополнительно были сформированы файлы панелей, содержащие информацию об аллельных вариантах каждого SSR-маркера. Для примера на рисунке 5 представлена часть панели для одного из маркеров мультиплексной системы 1 по каналу детекции флуоресценции R6G.

При интерпретации результатов фрагментного анализа первоначально проводится проверка соответствия

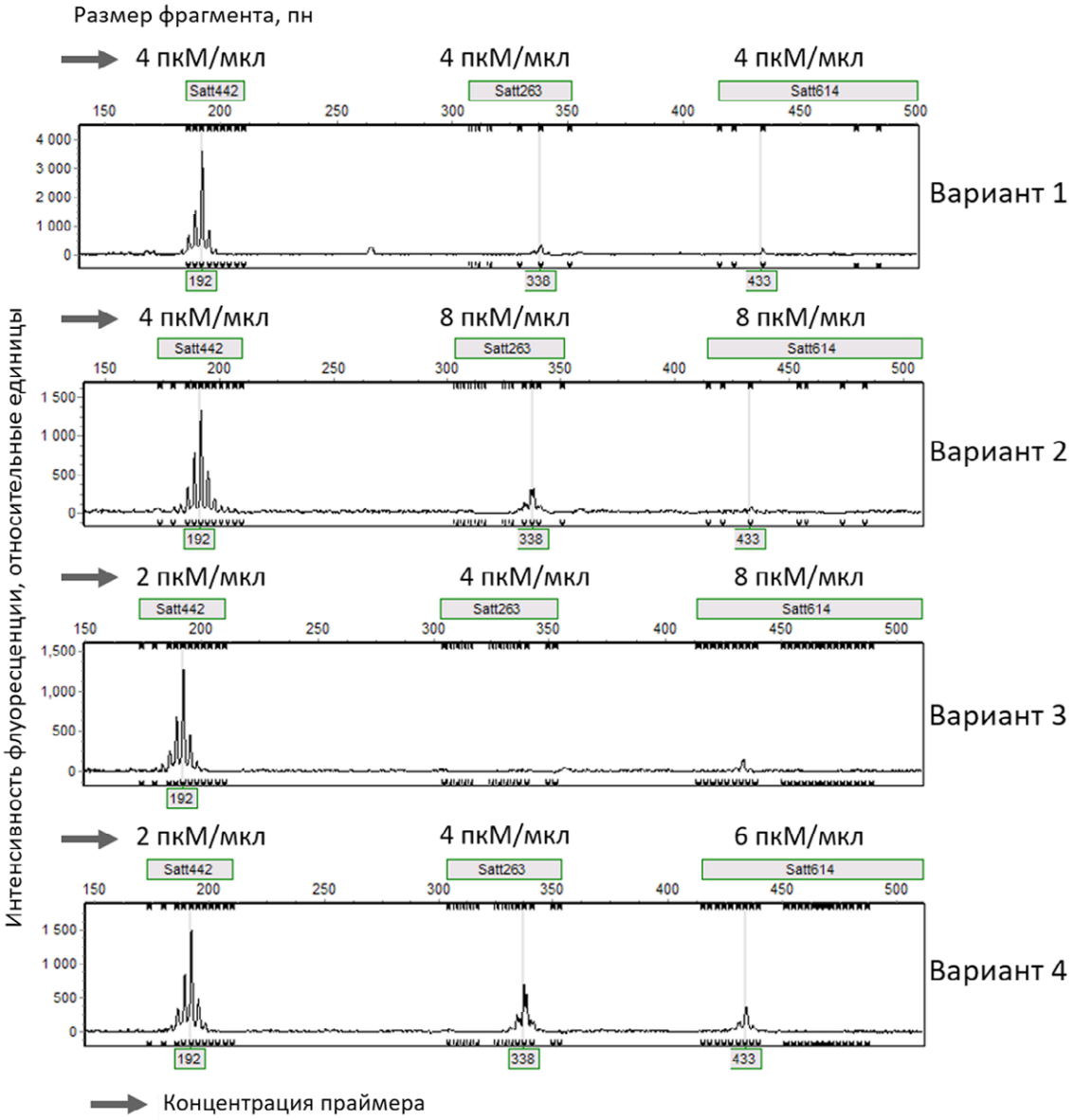


Рис. 4. Электрофореграммы разделения ПЦР-продуктов мультиплексной системы 1 (растение сорта 'Лира'): Satt442 – маркер с достаточной для интерпретации интенсивностью сигнала; **Satt263, Satt614** – маркеры с устойчиво пониженной интенсивностью сигнала

Fig. 4. Electrophoregrams of PCR product separation in multiplex system 1 (a plant of cv. 'Lira'): Satt442 – marker with signal intensity sufficient for interpretation; **Satt263** and **Satt614** – markers with consistently reduced signal intensity

Таблица 3. Характеристика разработанных мультиплексных систем SSR-маркеров сои

Table 3. Characteristics of the developed multiplex SSR marker systems for soybean

SSR-маркер	Концентрация каждого из пары праймеров, пкМ/мкл	Флуорофор	Количество выявленных аллелей*
Мультиплексная система 1			
Satt507	0,75	FAM	3
Satt681	1,75	FAM	4
Satt149	0,50	FAM	4
Satt532	0,75	R6G	4
Satt141	0,75	R6G	5
Satt614	4,50	R6G	6
Satt442	2,25	TAMRA	4

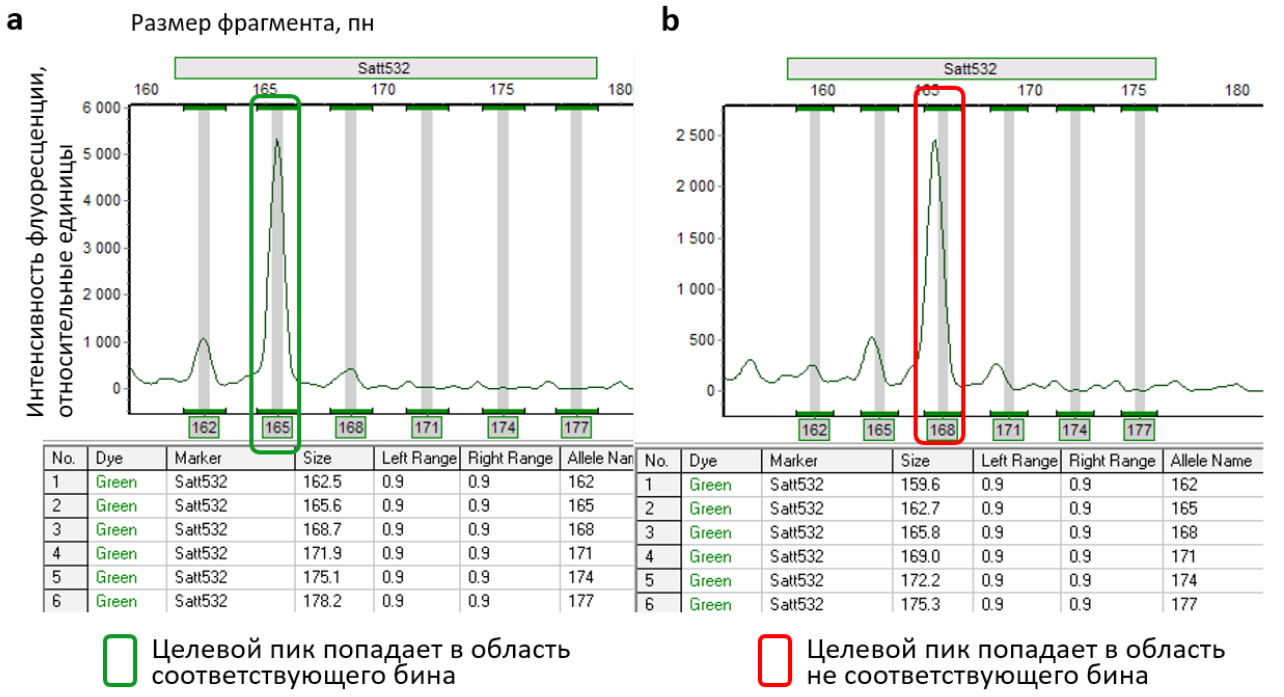
Таблица 3. **Окончание**

Table 3. **The end**

SSR-маркер	Концентрация каждого из пары праймеров, пкМ/мкл	Флуорофор	Количество выявленных аллелей*
Satt263	4,00	TAMRA	5
Satt309	2,00	ROX	3
Satt359	4,00	ROX	4
Satt286	4,75	ROX	4
Мультиплексная система 2			
CSSR531	0,25	FAM	4
Satt596	0,75	FAM	7
Satt287	0,75	FAM	2
Satt197	0,75	R6G	4
AW277661	0,50	R6G	3
Satt181	0,75	R6G	5
Satt168	2,75	TAMRA	4
Satt549	2,75	TAMRA	3
Satt353	1,75	ROX	3
Satt292	3,00	ROX	4
Soyprp1	3,25	ROX	3

Примечание: * – на выборке анализируемых образцов

Note: * – within the analyzed sample set



No.	Dye	Marker	Size	Left Range	Right Range	Allele Name
1	Green	Satt532	162.5	0.9	0.9	162
2	Green	Satt532	165.6	0.9	0.9	165
3	Green	Satt532	168.7	0.9	0.9	168
4	Green	Satt532	171.9	0.9	0.9	171
5	Green	Satt532	175.1	0.9	0.9	174
6	Green	Satt532	178.2	0.9	0.9	177

No.	Dye	Marker	Size	Left Range	Right Range	Allele Name
1	Green	Satt532	159.6	0.9	0.9	162
2	Green	Satt532	162.7	0.9	0.9	165
3	Green	Satt532	165.8	0.9	0.9	168
4	Green	Satt532	169.0	0.9	0.9	171
5	Green	Satt532	172.2	0.9	0.9	174
6	Green	Satt532	175.3	0.9	0.9	177

Рис. 5. **Определение положения панели для маркера Satt532 относительно пика ПКО:**
a – корректное положение; **b** – некорректное положение

Fig. 5. **Determining the position of the Satt532 marker panel versus the positive control peak:**
a – correct position; **b** – incorrect position

значения, определенного для ПКО в текущем анализе, контрольному значению. Согласно данным, приведенным в таблице 2, сорт 'Лира' по маркеру Satt532 имеет фрагмент размером 165 пн. При корректном положении панели целевой пик ПКО попадает в бин, соответствующий данному значению (165 пн) (см. рис. 5, a). В случае несоответствия (см. рис. 5, b), что может наблюдаться при изменении условий проведения электрофореза, положение панели корректируется до достижения совпадения значений. Таким образом обеспечивается сопоставимость результатов генотипирования между различными сериями анализа, что повышает надежность использования разработанных мультиплексных систем. При выявлении новых аллельных вариантов, появление которых возможно при анализе генотипов, не вошедших в настоящее исследование, данные панели будут пополняться.

Полученные результаты могут применяться для задач паспортизации и идентификации при условии анализа расширенного набора сортов и подтверждения уникальности их ДНК-профилей с учетом внутрисортового полиморфизма.

Заключение

В результате исследования разработаны две мультиплексные системы ДНК-маркеров, каждая из которых позволяет проводить одновременную амплификацию фрагментов ДНК 11 SSR-маркеров, что способствует сокращению продолжительности анализа. Для 19 из 22 микросателлитных локусов сконструированы новые последовательности праймеров, обеспечивающие их специфичность в мультиплексной ПЦР. Оптимизация условий проведения мультиплексной ПЦР позволила получить стабильную и воспроизводимую амплификацию фрагментов по каждому маркеру и надежно интерпретировать результаты фрагментного анализа. Разработанные мультиплексные системы SSR-маркеров могут быть использованы для паспортизации и идентификации сортов сои при подтверждении уникальности расширенной выборки сортов.

References / Литература

Alves S.I.A., Dantas C.W.D., Macedo D.B., Ramos R.T.J. What are microsatellites and how to choose the best tool: a user-friendly review of SSR and 74 SSR mining tools. *Frontiers in Genetics*. 2024;15:1474611. DOI: 10.3389/fgene.2024.1474611

Bondarenko O.N., Ivaniy A.A., Penzin A.A. The experience of using the certification system in establishing the varietal affiliation of soybeans. *Vestnik Chuvash SAU*. 2025;1(32):7-14. [in Russian] (Бондаренко О.Н., Иваний А.А., Пензин А.А. Опыт использования системы паспортизации в установлении сортовой принадлежности сои. *Вестник Чувашского государственного аграрного университета*. 2025;1(32):7-14). DOI: 10.48612/vch/xxxa-gr7g-5kf7

Divashuk M.G., Krupin P.Yu., Karlov G.I., Klimushina M.V., Samarina M.A, Zlobnova N.V., Arkhipov A.V. Method for molecular genetic identification of soybean cultivars and lines (Sposob molekulyarno-geneticheskoy identifikatsii sortov i liniy soi). Russian Federation; patent number: 2839697; 2025. [in Russian] (Дивашук М.Г., Крупин П.Ю., Карлов Г.И., Климушина М.В., Самарина М.А., Злобнова Н.В., Архипов А.В. Способ молекулярно-генетической идентификации сортов и линий сои. Российская Федерация; патент № 2839697; 2025). URL: https://www.fips.ru/cdfi/fips.dll/ru?ty=29&docid=2839697 [дата обращения: 17.03.2026].

Golovatskaya A.V., Guchetl S.Z. Assessment of the genetic diversity of sunflower lines of VNIIMK breeding based on multiplex microsatellite analysis. *Agrarian Science*. 2024;(11):117-121. [in Russian] (Головатская А.В., Гучетль С.З. Оценка генетического разнообразия линий подсолнечника селекции ВНИИМК на основе мультиплексного микросателлитного анализа. *Аграрная наука*. 2024;(11):117-121). DOI: 10.32634/0869-8155-2024-388-11-117-121

Guchetl S.Z., Golovatskaya A.V., Savichenko D.L., Loginova E.D., Zhudina E.I. Development of highly informative microsatellite markers for the genetic analysis of sunflower. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(4):142-154. [in Russian] (Гучетль С.З., Головатская А.В., Савиченко Д.Л., Логинова Е.Д., Жудина Э.И. Разработка высокоинформативных микросателлитных маркеров для генетического анализа подсолнечника. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(4):142-154). DOI: 10.30901/2227-8834-2025-4-142-154

Khlestkina E.K., Gavrilenko T.A., Chukhina I.G., Gekht M.A., Antonova O.Yu., Ukhatova Yu.V. Genetic passports: science for the economy. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2025;8(2):63-79. [in Russian] (Хлесткина Е.К., Гавриленко Т.А., Чухина И.Г., Гехт М.А., Антонова О.А., Ухатова Ю.В. Генетические паспорта: наука – экономике. *Биотехнология и селекция растений*. 2025;8(2):63-79). DOI: 10.30901/2658-6266-2025-2-o5

Kolobova O.S., Maluchenko O.P., Shalaeva T.V., Shanina E.P., Shilov I.A., Alekseev Ya.I. et al. Multiplexed set of 10 microsatellite markers for identification of potato varieties. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2017;21(1):124-127. [in Russian] (Колобова О.С., Малюченко О.П., Шалаева Т.В., Шанина Е.П., Шилов И.А., Алексеев Я.И. и др. Генетическая паспортизация картофеля на основе мультиплексного анализа 10 микросателлитных маркеров. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2017;21(1):124-127). DOI: 10.18699/VJ17.230

Koltun A., da Silva P.A., Torres I.Y., Bonifácio-Anacleto F., Yassitepe J.E.C.T. Microsatellite markers in maize: challenges and guidelines for implementing multiplex SSR analyses. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*. 2024;24(1):e46392411. DOI: 10.1590/1984-70332024v24n1a01

Li F., Sayama T., Yokota Y., Hiraga S., Hashiguchi M., Tanaka H. et al. Assessing genetic diversity and geographical differentiation in a global collection of wild soybean (*Glycine soja* Sieb. et Zucc.) and assigning a mini-core collection. *DNA Research*. 2024;31(2):dsae009. DOI: 10.1093/dnares/dsae015

Modorov M.V., Kiseleva O.A., Polezhaeva M.A., Chebotok E.M. Development of multiplex microsatellite markers set for black currant (*Ribes nigrum* L.) genetic identification. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2024;7(4):68-81. [in Russian] (Модоров М.В., Киселева О.А., Полежаева М.А., Чеботок Е.М. Разработка мультиплексного набора микросателлитных маркеров для генетической идентификации черной смородины (*Ribes nigrum* L.). *Биотехнология и селекция растений*. 2024;7(4):68-81). DOI: 10.30901/2658-6266-2024-4-o6

NIH. National Library of Medicine. National Center for Biotechnology Information. Genome assembly Glycine_max_v4.0: [website]. Available from: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/datasets/genome/GCF_000004515.6 [accessed Jan. 12, 2026].

NIH. National Library of Medicine. National Center for Biotechnology Information. Primer-BLAST: A tool for finding specific primers: [website]. Available from: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/tools/primer-blast [accessed Jan. 12, 2026].

Ramazanova S.A., Kolomytseva A.S. Optimization of soybean genotyping process using analysis of a polymorphism of SSR-loci in DNA. *Oil Crops*. 2020;1(181):42-48. [in Russian] (Рамазанова С.А., Коломыцева А.С. Оптимизация технологии генотипирования сои на основе анализа полиморфизма SSR-локусов ДНК. *Масличные культуры*. 2020;1(181):42-48). DOI: 10.25230/2412-608X-2020-1-181-42-48

Ramazanova S.A., Savichenko V.G., Ustarkhanova E.G., Loginova E.D., Ramazanov R.M., Guchetl A.Kh. Search of the new SSR-loci of DNA for development of effective technology for soybean genotyping. *Oil Crops***.** 2021;4(188):18-24. [in Russian] (Рамазанова С.А., Савиченко В.Г., Устарханова Э.Г., Логинова Е.Д., Рамазанов Р.М., Гучетль А.Х. Поиск новых SSR-локусов ДНК для создания эффективной технологии генотипирования сои. *Масличные культуры*. 2021;4(188):18-24). DOI: 10.25230/2412-608X-2021-4-188-18-24

Savichenko V.G., Ramazanova S.A., Guchetl S.Z. Search of informative SSR-markers for soybean cultivars passportization. *Oil Crops.* 2024a;2(198):10-15. [in Russian] (Савиченко В.Г., Рамазанова С.А., Гучетль С.З. Поиск информативных SSR-маркеров для паспортизации сортов сои. *Масличные культуры*. 2024a;2(198):10-15). DOI: 10.25230/2412-608X-2024-2-198-10-15

Savichenko V.G., Savichenko D.L., Ramazanova S.A., Guchetl' S.Z. Genetic polymorphism of soybean varieties bred by All-Russian Research Institute of Oil Crops. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2024b;38(10):5-10. [in Russian] (Савиченко В.Г., Савиченко Д.Л., Рамазанова С.А., Гучетль С.З. Генетический полиморфизм сортов сои селекции ВНИИМК. *Достижения науки и техники АПК*. 2024b;38(10):5-10). DOI: 10.53859/02352451_2024_38_10_5

Shilov I.A., Velishaeva N.S., Aniskina Yu.V., Kolobova O.S., Shalaeva T.V., Borisenko O.M. et al. Genetic identification of *Helianthus annuus* L. sunflower lines and hybrids based on multiplex microsatellite analysis. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2023;37(1):10-15. [in Russian] (Шилов И.А., Велишаева Н.С., Анискина Ю.В., Колобова О.С., Шалаева Т.В., Борисенко О.М. и др. Генетическая идентификация линий и гибридов подсолнечника *Helianthus annuus* L. на основе мультиплексного микросателлитного анализа. *Достижения науки и техники АПК*. 2023;37(1):10-15). DOI: 10.53859/02352451_2023_37_1_10

SoyBase: [website]. Available from: https://www.soybase.org [accessed Jan. 14, 2026].

Tripathi M.K., Tripathi N., Tiwari S., Mishra N., Sharma A., Tiwari S. et al. Identification of Indian soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) genotypes for drought tolerance and genetic diversity analysis using SSR markers. *Scientist*. 2023;3(3):31-46. DOI: 10.5281/zenodo.7697640

Zatybekov A., Yermagambetova M., Genievskaya Y., Didorenko S., Abugalieva S. Genetic diversity analysis of soybean collection using simple sequence repeat markers. *Plants (Basel)*. 2023;12(19):3445. DOI: 10.3390/plants12193445

Zubov V.V., Sakhabutdinova A.R., Chemeris D.A., Garafutdinov R.R., Chemeris A.V. Variants of PCR with more than two primers. II. The principle and features of multiplex PCR. *Biomics*. 2024;16(2)234-243. [in Russian] (Зубов В.В., Сахабутдинова А.Р., Чемерис Д.А., Гарафутдинов Р.Р., Чемерис А.В. Варианты ПЦР с более чем двумя праймерами. II. Принцип и особенности мультиплексной ПЦР. *Биомика*. 2024;16(2):234-243). DOI: 10.31301/2221-6197.bmcs.2024-14

Информация об авторе

Виолетта Георгиевна Савиченко, научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В.С. Пустовойта, 350038 Россия, Краснодар, ул. им. Филатова, 17, violet.savichenko@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6803-7809

Information about the author

Violetta G. Savichenko, Researcher, V.S. Pustovoit All-Russia Research Institute of Oil Crops, 17 Filatova St., Krasnodar 350038, Russia, violet.savichenko@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6803-7809

Статья поступила в редакцию 30.01.2026; одобрена после рецензирования 05.05.2026; принята к публикации 14.05.2026.
The article was submitted on 30.01.2026; approved after reviewing on 05.05.2026; accepted for publication on 14.05.2026.

СИСТЕМАТИКА, ФИЛОГЕНИЯ И ГЕОГРАФИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 581.55
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o10

CC BY

Диапазон экологических и ценотических характеристик *Humulus lupulus* L. на юге Западной Сибири

Н. В. Овчарова[1], И. С. Чупина[2], М. М. Силантьева[1], О. Н. Мироненко[1]

[1] *Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия,*

[2] *Центральный сибирский ботанический сад Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия*

Автор, ответственный за переписку: Наталья Владимировна Овчарова, ovcharova_n_w@mail.ru

Актуальность. Экономическая значимость хмеля как ресурсного вида и его широкое распространение на юге Западной Сибири определяют актуальность исследований его экологической и ценотической приуроченности для оценки природного ресурсного потенциала.
Материалы и методы. В базе данных геоботанических описаний программы Turboveg проанализирована выборка из 247 описаний с участием хмеля обыкновенного с территории Алтайского, Красноярского краев, Новосибирской, Тюменской, Омской, Кемеровской областей, Республики Алтай. Для обработки описаний использовался программный пакет IBIS. Для выявления связей растительных сообществ с экологическими факторами среды проведена CCA-ординация (canonical correspondence analysis) с использованием пакета PAST 4. При характеристике эдафических факторов проанализированы 34 почвенных образца.
Результаты. В пределах ареала хмеля обыкновенного на юге Западной Сибири отмечается широкий диапазон экологических и ценотических характеристик местообитаний. Результаты ординационного анализа показывают, что хмель, по классификации на основе системы EUNIS, модифицированной для Сибири, встречается в лесных, кустарниковых, травяных, антропогенных сообществах. С помощью анализа CCA-ординации, выполненного для сообществ с участием хмеля, определены диапазоны факторов: увлажнение почв, гемероботолерантность, богатство и засоленность почв. На градиенте увлажнения почв вся выборка описаний с участием хмеля занимает отрезок от 52-й до 80-й ступени шкалы экологических оптимумов для растений юга Сибири. На градиенте богатства-засоления он охватывает диапазон 10–13-й ступени, что соответствует довольно богатым почвам. Диапазон кислотно-щелочного баланса (pH) исследуемой почвы находится в пределах 4,3–7,2. Наибольшее содержание органических веществ (до 15%) наблюдается в кустарниковых сообществах, что, вероятно, связано с накоплением органической массы опада. Наименьшее количество гумуса (1,9–6,5%) наблюдается на заболоченных местообитаниях.

Ключевые слова: *Humulus lupulus* L., ареал, ординация, классификация биотопов системы EUNIS

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-64-10040, https://rscf.ru/project/23-64-10040/.

Для цитирования: Овчарова Н.В., Чупина И.С., Силантьева М.М., Мироненко О.Н. Диапазон экологических и ценотических характеристик *Humulus lupulus* L. на юге Западной Сибири.*Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(2):207-216. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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.

© Овчарова Н.В., Чупина И.С., Силантьева М.М., Мироненко О.Н., 2026

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

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o10

The range of environmental and cenotic characteristics of *Humulus lupulus* L. in the south of Western Siberia

Natalia V. Ovcharova[1], Irina S. Chupina[2], Marina M. Silantyeva[1], Olga N. Mironenko[1]

[1] *Altai State University, Barnaul, Russia*

[2] *Central Siberian Botanical Garden of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

Corresponding author: Natalia V. Ovcharova, ovcharova_n_w@mail.ru

Background. Economic importance of the hop as a resource species and its widespread distribution in the south of Western Siberia determine the relevance of studying its environmental and cenotic affinity to assess its natural resource potential.
Materials and methods. A set of 247 descriptions from the Turboveg database of geobotanical information, pertaining to common hop from Altai and Krasnoyarsk Territories, Novosibirsk, Tyumen, Omsk, and Kemerovo Provinces and the Altai Republic, was analyzed. The IBIS software package was used to process the descriptions. CCA ordination (canonical correspondence analysis) with the PAST 4 software package was performed to identify the relationships between plant communities and environmental factors. Thirty-four soil samples were analyzed to characterize edaphic factors.
Results. There is a wide range of environmental and cenotic characteristics of hop habitats within the species' area of distribution in the south of Western Siberia. The results of the ordination analysis show that based on the EUNIS system modified for Siberia, hop occurs in forest, shrub, grass, and anthropogenic communities. The CCA ordination for hop-including communities helped to define the ranges of factors: soil moisture, hemerobotolerance, soil richness, and soil salinity. On the soil moisture gradient, the entire set of hop-related descriptions occupies the span from 52 to 80 degrees according to the scale of environmental optima for plants in southern Siberia. On the soil richness/salinity gradient, it covers the range of 10–13 degrees, which corresponds to fairly rich soils. The range of acid-base balance (pH) of the soil under study is within 4.3–7.2. The highest content of organic substances (up to 15%) is observed in shrub communities, probably due to the accumulation of litter organic mass. The least amount of humus (1.9–6.5%) is observed in swampy habitats.

Keywords: *Humulus lupulus* L., range, ordination, EUNIS system biotype classification

Acknowledgments: the study was funded by the Russian Science Foundation, Grant No. 23-64-10040, https://rscf.ru/en/project/23-64-10040/.

For citation: Ovcharova N.V., Chupina I.S., Silantyeva M.M., Mironenko O.N. The range of environmental and cenotic characteristics of *Humulus lupulus* L. in the south of Western Siberia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(2):207-216. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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

Хмель обыкновенный (*Humulus lupulus* L.) – ценное ресурсное растение семейства Cannabaceae. Ареал хмеля охватывает огромную территорию умеренных широт Голарктики и имеет участки как первичного, так и вторичного ареала.

Хмель уже тысячи лет используется в пивоварении, хлебопечении, а также как пищевое, лекарственное, кормовое растение. В последние десятилетия усилился интерес к нему как к источнику ценных вторичных метаболитов, находящих применение в медицине, косметологии, производстве функциональных продуктов питания, натуральных продуктов гигиены. На новой технологической основе произошло возрождение интереса к хмелю и в пивоварении. Широкая палитра вкусов и оригинальные местные сорта – это новый тренд отрасли. Содержание большого количества биологически активных веществ делает хмель перспективным для фармацевтической промышленности (Korpelainen, Pietiläinen, 2021; Pereira et al., 2022).

Экономическая значимость хмеля как ресурсного вида и его широкое распространение на юге Западной Сибири определяют актуальность исследований его экологической и ценотической приуроченности для оценки природного ресурсного потенциала.

Изучение особенностей распространения хмеля обыкновенного, его экологии, ценотических характеристик, вирусной нагрузки в природных популяциях на юге Западной Сибири ведется нами в течении последних пяти лет (Khlebova et al., 2022, 2025; Silantyeva et al., 2024, 2025).

На юге Западной Сибири произрастает *H. lupulus* subsp. *lupulus*, представленный огромным разнообразием дикорастущих популяций, формами, являющимися беглецами из культуры, а также сортами на промышленных плантациях. Значительный диапазон лесных, кустарниковых, травяных и антропогенных мест обитания (Silantyeva et al., 2024) характеризуется разнообразием экологических условий.

Ранее нами был оценен диапазон встречаемости хмеля в лесных сообществах северо-западной части Алтае-Саянской горной области с повышенным увлажнением: неморальных, высокотравных субальпийско-лесных, пойменно-лесных и темнохвойных. По ценотической приуроченности он относится к пойменно-лесной группе, которая в алтае-саянской части своего ареала аналогична ольшаниковому ценоэлементу – «ядру» видового состава влажных широколиственных лесов речных долин Европы (Silantyeva et al., 2025).

Широкий ценотический диапазон распространения хмеля напрямую связан с экологической амплитудой вида. Наиболее изучен этот вопрос в работах сельскохозяйственной направленности (Milosta, Lapa, 2010; Ivanov et al., 2014). Так, в границах российской части ареала сумма активных температур (выше 10°C) составляет от 1000° до 3500°C, среднегодовая температура – от 1,5° до 8,5°C, сумма осадков за вегетационный период – от 200 до 600 мм. Наиболее высокую потребность во влаге хмель проявляет в период цветения и начала образования соплодий. Для оптимального развития хмеля важны воздействие низких температур в период покоя и умеренная температура в весенний период (Rossini et al., 2021). Хмель очень требователен к плодородию и физическим показателям почвы. На уплотненных почвах растения испытывают недостаток воды и воздуха (Ivanov et al., 2014). Благоприятными для хмеля являются дерново-подзолистые, серые лесные и черноземные почвы, достаточно увлажненные, но без близкого залегания грунтовых вод, со слабокислой или нейтральной реакцией (Godovany et al., 1990; Milosta, Lapa, 2010). Хмель – светолюбивая культура, за вегетационный период растению необходимо 1500–1700 часов солнечной радиации, при этом более половины ее должно приходиться на период от цветения до технической спелости «шишек».

Цель работы – оценка диапазона экологических и ценотических характеристик *Humulus lupulus* L. на юге Западной Сибири.

Материалы и методы

Основой для анализа послужила созданная с использованием программы Turboveg (Hennekens, Schaminée, 2001) база данных из 247 геоботанических описаний с участием хмеля обыкновенного с территории Алтайского, Красноярского краев, Новосибирской, Тюменской, Омской, Кемеровской областей, Республики Алтай (рис. 1). Описания растительных сообществ выполняли

Рис. 1. Карта-схема мест выполнения описаний с участием хмеля
Fig. 1. Diagrammatic map of the sites where hop-related descriptions were made

на учетных площадках размером от 100 до 300 м^2, участие видов в сложении фитоценозов указывали в процентах проективного покрытия. Для обработки описаний использовали программный пакет IBIS (Zverev, 2007). Латинские названия видов растений приведены согласно Plants of the World Online (POWO) (https://powo.science.kew.org).

Основой для классификации местообитаний являлась методология европейской системы EUNIS (European Union Nature Information System), ранее примененная для Западной Сибири (Smelyansky, Pronkina, 2009) и адаптированная нами для охвата всего разнообразия местообитаний (биотопов) хмеля обыкновенного на юге Западной Сибири (Silantyeva et al., 2024). Подходы к классификации наземных местообитаний в EUNIS в значительной степени основаны на высокой индикационной роли синтаксонов растительности разного ранга (Schaminée et al., 2014), что позволяет классифицировать все основные биотопы, включая антропогенные (Rodwell et al., 2018; Lavrinenko, 2020; Lavrinenko I., Lavrinenko O., 2020).

Для характеристики эдафических условий проанализированы 34 почвенных пробы, отобранные ручным буром с верхнего горизонта (0–20 см), по методике В. А. Доспехова (Dospekhov, 1985). Агрохимический анализ почвы (pH, содержание органического вещества) проведен в аккредитованной лаборатории (ФГБУ ЦАС «Алтайский»).

Для выявления связей растительных сообществ с экологическими факторами среды проведена CCA-ординация (canonical correspondence analysis) с использованием пакета PAST 4. Также определялось положение сообществ на градиентах увлажнения и богатства-засоления почв с использованием шкалы экологических оптимумов растений (Korolyuk, 2006). Для выявления группы фитоценотически значимых растений учитывались описания с обилием хмеля более 15%, виды ранжировались по активности согласно методике Л. И. Малышева (Malyshev, 1973). Диаграммы размаха строились в программе PAST 4.

Результаты

Эколого-ценотический диапазон местообитаний хмеля

В пределах юга Западной Сибири хмель обыкновенный имеет значительный диапазон мест обитания: от ненарушенных лесных фитоценозов до урбанизированных территорий. Разработанная нами ранее классификация сибирских местообитаний (Silantyeva et al., 2024) включает три иерархических уровня, каждый из которых имеет описание и краткую характеристику. Распределение геоботанических описаний по основным группам местообитаний первого иерархического уровня представлено в таблице 1.

Таблица 1. Распределение геоботанических описаний по основным группам классификации местообитаний первого иерархического уровня

Table 1. Distribution of geobotanical descriptions according to the main groups of habitat classification at the first hierarchical level

№ местообитаний / Locality No.	Тип местообитаний / Habitat type	Количество описаний / Number of descriptions
I	Леса, редколесья и другие облесенные территории	103
II	Кустарниковые сообщества	54
III	Болота	9
IV	Травяные сообщества	59
VI	Местообитания, возникшие на месте садовых или приусадебных участков, парков, а также заброшенных участков и парков	13
VII	Поселения, здания, промышленные объекты, свалки	9
Всего		247

Проведенный в ходе данной работы анализ позволил детализировать классификацию и дать характеристику фитоценотических особенностей биотопов второго уровня иерархии, которая приведена ниже. В составе сообществ с участием *H. lupulus* отмечено 629 видов высших растений, принадлежащих к 84 семействам.

I. Леса, редколесья и другие облесенные территории

I.1. Леса и насаждения с доминированием летнезеленых лиственных деревьев

В мелколиственных лесах с доминированием видов березы повислой (*Betula pendula* L.), березы пушистой (*B. pubescens* Ehrh.), осины (*Populus tremula* L.), иногда с примесью кустарниковых ив и/или хвойных, хмель встречается довольно редко, чаще на местах, где ранее были вырубки или образовались прогалины после ветровала. Хмель в таких сообществах растет при условии хорошего дренажа.

Преобладающая высота деревьев – 15–20 м с диаметром ствола, не превышающим 25 см. Кустарниковый ярус в березовых, осиново-березовых лесах состоит преимущественно из караганы древовидной (*Caragana arborescens* Lam.), шиповника иглистого (*Rosa acicularis* Lindl.),

ш. коричного (*R. cinnamomea* L. [syn. *R. majalis* Herrm.]), таволги зверобоелистной (*Spiraea hypericifolia* L.), черемухи обыкновенной (*Prunus padus* L. [syn. *Padus avium* Mill.]), боярышника кроваво-красного (*Crataegus sanguinea* Pall.), крушины ольховидной (*Frangula alnus* Mill.), калины обыкновенной (*Viburnum opulus* L.). В заболоченных сообществах в подлеске преобладают ивняки – ива белая (*Salix alba* L.), и. пепельная (*S. cinerea* L.), и. прутовидная (*S. viminalis* L.), и. пятитычинковая (*S. pentandra* L.).

Экологический и видовой состав травяного покрова характеризует особенности лесорастительных условий и служит показателем характера местообитаний. В травяном покрове отмечается не более 10 господствующих и согосподствующих видов. Это такие доминанты, как вейник наземный (*Calamagrostis epigejos* (L.) Roth), в. седеющий (*C. canescens* (Weber) Roth), в. тростниковый (*C. arundinacea* (L.) Roth), ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.), мятлик луговой (*Poa pratensis* L.), м. узколистный (*P. angustifolia* L.), коротконожка перистая (*Brachypodium pinnatum* (L.) Beauv.), плевел луговой (*Lolium pratense* (Huds.) Darbysh. [syn. *Festuca pratensis* Huds.]). При повышенном увлажнении в число доминантов входят осоки: осока береговая (*Carex riparia* Curtis), о. пузырчатая (*C. vesicaria* L.), о. двурядная (*C. disticha* Huds.), о. дернистая (*C. cespitosa* L.). Местами господствует орляк обыкновенный (*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn). В глубине леса при сомкнутом пологе травостой редкий, покрытие почвы составляет не более 50–60%. Там, где начинают встречаться теневыносливые виды, хмель отмечается в единичных описаниях, а проективное покрытие составляет не более 10%.

На участках, где ранее были вырубки или образовались прогалины после ветровала, обычно отмечается значительная доля апофитов и сорняков – до 15–20% от общего флористического состава. На стадиях восстановления мелколиственного леса (*Betula pubescens*, *Populus tremula*) хмель активно расселяется и содоминирует с крапивой двудомной (*Urtica dioica* L.), икотником серо-зеленым (*Berteroa incana* (L.) DC.), марью белой (*Chenopodium album* L.), льнянкой обыкновенной (*Linaria vulgaris* Mill.), репешком волосистым (*Agrimonia pilosa* Ledeb.).

I.2. Хвойные леса с доминированием видов пихты *Abies* Mill., сосны *Pinus* L., ели *Picea* A. Dietr.

В горных хвойных лесах с доминированием видов *Abies*, *Pinus*, ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) до высоты 800 м и в равнинных темнохвойно-таежных лесах с доминированием пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.), *Picea obovata*, сосны сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour) хмель встречается обычно по опушкам, на местах ветровалов и вырубок, вдоль лесных ручьев, небольших рек, лесных дорог. Средний возраст деревьев – 80–90 лет, средняя высота не превышает 25 м, диаметр стволов – не более 30 см, сомкнутость крон – 0,7.

Как было показано нами ранее (Silantyeva et al., 2025), максимальная концентрация геоботанических описаний с участием хмеля наблюдалась в составе сообществ черневого подпояса в избыточно влажном циклоническом биоклиматическом секторе. Значительно реже этот вид встречался в составе лесных ценозов подтаежного подпояса влажного циклонического биоклиматического сектора Алтае-Саянской горной страны.

Хмель изредка отмечался в вейниковых, осоковых и злаково-разнотравных сосновых негустых лесах с редкими березами, осинами и с подлеском из *Caragana arborescens*. Травостой хорошо развит, видовое разнообразие составляет до 30 видов, общее проективное покрытие достигает 60%. Реже всего хмель представлен в хвойных заболоченных лесах к югу от таежной зоны из сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), иногда с *Betula pubescens* по болотам степной и лесостепной зон.

I.3. Смешанные (лиственно-хвойные) леса

В лиственных заболоченных лесах в комбинации с заболоченными хвойными лесами, а также в сосновых лесах, смешанных с березовыми лесами к югу от тайги, хмель встречается довольно обычно, преимущественно по окраинам лесов, по пониженным закустаренным участкам, лесным дорогам.

Хмель отмечен в березово-сосновых лесах, по пониженным закустаренным участкам, опушкам лесов и лесным дорогам. Средний возраст сосны в березово-сосновых лесах достигает 120 лет. Сомкнутость крон – 0,5, диаметр стволов не превышает 30 см, средняя высота деревьев – 15–20 м. Хмель с проективным покрытием до 30% чаще всего встречается в вейниковых, осоковых, разнотравных вариантах леса. Кустарниковый ярус состоит из *Caragana*, *Spiraea*, *Prunus padus*, *Salix*. Травостой хорошо развит, с проективным покрытием до 80–100%, задернованность небольшая. Среди злаков доминирующими видами отмечаются: овсец пушистый (*Avenula pubescens* (Huds.) Dumort.), *Brachypodium pinnatum*, овсяницы, из бобовых представлены: горошек мышиный (*Vicia cracca* L.), *V. sepium*, чина Гмелина (*Lathyrus gmelinii* (Fisch. ex Ser.) Fritsch), ч. гороховидная (*L. pisiformis* L.). Хмель оплетает стволы деревьев до 4–5 м в высоту.

I.4. Лесополосы, небольшие антропогенные лески, свежие вырубки, начальные стадии восстановления леса и лесных культур

Довольно часто хмель встречается в лесополосах, включая кленовые сообщества из клена ясенелистного (*Acer negundo* L.), а также вдоль дорог.

II. Кустарниковые сообщества

Хмель обычен в зарослях ив и других кустарников по низинным болотам, болотистым поймам и берегам рек с доминированием крупных или средних по размеру ив (*Salix cinerea*, *S. pentandra*), иногда с участием *Frangula alnus*, жостера слабительного (*Rhamnus cathartica* L.), *Betula pubescens*, с большим проективным покрытием, обильно плодоносит.

Также с высоким проективным покрытием хмель встречается в мезофильных кустарниковых сообществах Салаира и Алтая с доминированием *Caragana arborescens*, *Spiraea* spp., жимолости татарской (*Lonicera tatarica* L.), *Rosa* spp., *Prunus padus*, *Viburnum opulus*.

III. Болота

В местообитаниях, занятых торфообразующими сообществами, хмель встречается по окраинам болот, где есть небольшие деревья, кустарники или заросли наземных маловидовых, часто монодоминатных высоких гелофитов из злаковых и осоковых и др. Основными доминирующими видами в травянистом покрове являются: *Calamagrostis canescens*, тростник обыкновенный (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), *Carex riparia*, *C. vesicaria*. Травостой с встречаемостью хмеля высокий, густой, двухъярусного сложения: 1-й ярус – до 140 см, 2-й – до 50 см. Могут встречаться осоковые кочки высотой до 50 см. Из кустарников представлены: *Salix alba*, ива козья (*S. caprea* L.), и. трехтычинковая (*S. triandra* L.), *S. cinerea*, *Prunus padus*.

IV. Травяные сообщества

На лесных опушках, вырубках, в сообществах вдоль водотоков, оврагов или на влажных лугах по краю леса с присутствием кустарников хмель встречается довольно обычно, с большим проективным покрытием.

Наиболее типичные ассоциации, где представлен хмель с проективным покрытием до 30–50%, – разнотравно-щучковая, полевицевая, осоковые и вейниковые низинные луга с единичными деревьями, которые служат опорой для произрастания хмеля. Эдификаторами выступают гигрофиты – *Carex vesicaria*, мятлик болотный (*Poa palustris* L.), мезофиты и мезогигрофиты – купальница азиатская (*Trollius asiaticus* L.), тимофеевка луговая (*Phleum pretense* L.), *Lolium pratense*, *Dactylis glomerata*, *Calamagrostis arundinaceae*, *C. epigejos*, лабазник вязолистный (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim.).

В редких случаях хмель встречался в сообществах остепненных суходольных лугов, которые характеризуются богатством видового состава со значительным присутствием ксерофитов. При этом хмель, цепляясь за травы, лишь незначительно приподнимается над верхним ярусом травостоя. Злаковую основу травостоя создают лугово-степные виды: *Poa angustifolia*, *Phleum phleoides*, овсяница ложноовечья (*Festuca pseudovina* Hack. ex Wiesb. [syn. *Festuca pulchra* Schur]), тонконог крупноцветковый (*Koeleria macrantha* (Ledeb.) Schult.), кострец безостый (*Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub [syn. *Bromus inermis* Leyss.]), полевица собачья (*Agrostis canina* L.), ковыль волосатик (*Stipa capillata* L.). Разнотравье представлено видами: лапчатка распростертая (*Potentilla humifusa* Willd. ex D.F.K. Schltdl.), л. серебристая (*P. argentea* L.), прострел раскрытый (*Pulsatilla patens* (L.) Mill.), люцерна серповидная *(Medicago falcate* L.), осока приземистая (*Carex supina* Willd. ex Wahlenb.), осока твердоватая (*C. duriuscula* C.A. Mey.), вероника седая (*Veronica incana* L.), в. колосистая (*V. spicata* L.), земляника зеленая (*Fragaria viridis* Weston), горошек приятный (*Vicia amoena* Fisch. ex Ser.), тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium* L.), горичник Морисона (*Peucedanum morisonii* Besser ex Schult.).

V. Местообитания, возникшие на месте садовых или приусадебных участков, парков, а также заброшенных участков и парков

Хмель довольно обычен в посадках культур плодовых, овощных и декоративных видов дачных и садовых участков, небольших посадках и скверах около зданий, а также в огородах в непосредственной близости от жилья. В качестве опоры хмель чаще всего использует следующие деревья и кустарники: *Acer negundo*, береза повислая (*Betula pendula*), вяз гладкий (*Ulmus laevis* Pall.), в. шероховатый (*U. glabra* Huds.), яблоня ягодная (*Malus baccata* (L.) Borkh.), *Populus tremula*, ирга овальная (*Amelanchier ovalis* Medik.), кизильник рыхлоцветковый (*Cotoneaster laxiflorus* J. Jacq. ex Lindl.), *Prunus padus*, сирень обыкновенная (*Syringa vulgaris* L.), с. венгерская (*S. josikaea* J. Jacq. ex Rchb.). Также хмель успешно осваивает в качестве опоры ограждения садоводческих товариществ и опоры линий электропередач из стального профиля.

VI. Поселения, здания, промышленные объекты, свалки

Хмель широко распространен в городах, поселках и деревнях, где заборы и стены заброшенных строений выступают для него в качестве типичных местообитаний. Это фитоценозы самых разнообразных искусственных экотопов с бесструктурными, местами бедными питательными элементами почвогрунтами. Эдификаторами и соэдификаторами являются травянистые виды растений: клоповник мусорный (*Lepidium ruderale* L.), лебеда татарская (*Atriplex tatarica* L.), *Chenopodium album*, гулявник Лёзеля (*Sisymbrium loeselii* L.), вьюнок полевой (*Convolvulus arvensis* L.), щирица запрокинутая (*Amaranthus retroflexus* L.), бодяк щетинистый (*Cirsium setosum* (Willd.) Besser), полынь горькая (*Artemisia absinthium* L.), п. обыкновенная (*A. vulgaris* L.), *Lolium pratense*, *Dactylis glomerata*.

Экологический диапазон мест обитаний

Для выявления связей растительности с экологическими факторами была проведена CCA-ординация сообществ с использованием статусов увлажнения почв (У), богатства и засоления почв (Б-З), гемероботолерантности (Г) (Korolyuk, 2006; Zverev et al., 2018). Основная часть описаний на схеме образовала компактную группу, что свидетельствует о сходстве экологических параметров их местообитаний. Также описания образовали экологические ряды относительно выбранных факторов (рис. 2).

На втором этапе анализа с использованием экологических шкал для растений Южной Сибири выявлено, что на градиенте увлажнения почв вся выборка описаний с участием хмеля занимает отрезок от 52-й до 80-й ступени. Ценозы с высоким обилием хмеля (от 15%) попали в отрезок увлажнения от 53-й до 71-й, что соответствует сухо-луговому и влажно-луговому увлажнению почв. На градиенте богатства-засоления он охватывает диапазон 10–13-й ступени, что соответствует довольно богатым почвам. Положение описаний с высоким обилием хмеля аналогично. Это позволяет отнести хмель к гликофитным видам.

Экологию сообществ хорошо отражают высокоактивные виды растений, определяющие его структуру и функционирование. В сообществах с высоким проективным покрытием *Humulus lupulus* (от 15%) активными видами выступают: *Urtica dioica* (активность – 30), *Prunus padus* (22), *Populus tremula* (21), *Aegopodium podagraria* (20), *Pteridium aquilinum* (13), оноклея обыкновенная (*Onoclea struthiopteris* (L.) Roth) (13), *Filipendula ulmaria* (13), *Betula pubescens* (12), малина обыкновенная (*Rubus idaeus* L.) (11), карагана кустарниковая (*Caragana frutex* (L.) K. Koch) (11). При этом, активность хмеля среди проанализированных сообществ максимальна и равна 68. Эумезофиты *Urtica dioica*, *Prunus padus*, *Populus tremula*, *Aegopodium podagraria*, *Pteridium aquilinum* и *Rubus idaeus* приурочены к довольно богатым (часто азотистым) почвам с умеренным увлажнением. Эти виды обычны для лесов, кустарниковых сообществ, часто произрастают по берегам водоемов, вблизи населенных пунктов. Мезогигрофиты *Onoclea struthiopteris*, *Filipendula ulmaria* и *Betula pubescens* приурочены к более влажным почвам и произрастают в пойменных лесах, кустарниковых зарослях, низинных лугах, в депрессиях на плоских участках водоразделов. Гемиксерофит *Caragana frutex* нередко формирует заросли на приречных террасах, на опушках мелколиственных и сосновых лесов. При анализе всей выборки описаний в составе высокоактивных видов увеличивается число эумезофитов: *Betula pendula* (активность – 21), *Daclylis glomerata* (14), осока большехвостая (*Carex pediformis* var. *macroura* (Meinsh.) Kük.) (13) и бо-

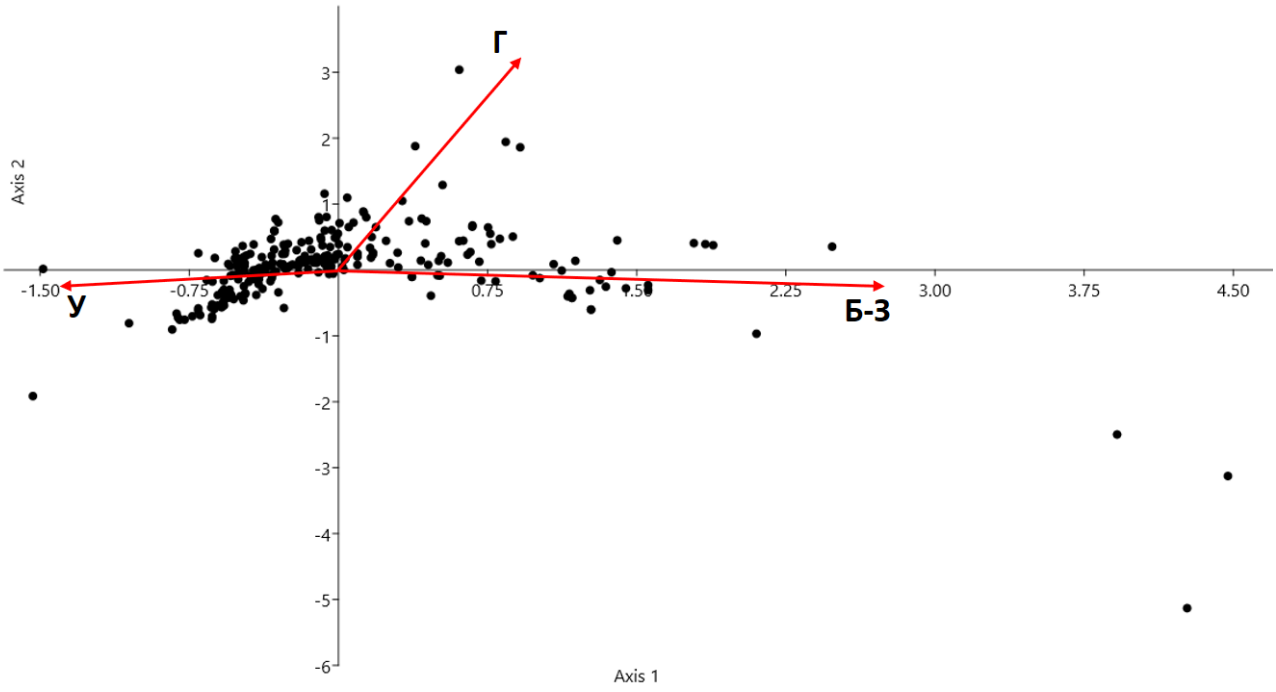


Рис. 2. **ССА-ординация сообществ с участием *Humulus lupulus* L. Факторы: У – увлажнение почв; Г – гемеробототолерантность; Б-З – богатство и засоленность почв**

Fig. 2. **CCA ordination of communities that included *Humulus lupulus* L. Factors: У – soil moisture; Г – hemerobotolerance; Б-З – soil richness and salinity**

рец северный (*Aconitum septentrionale* Koelle) (12). Активность *Humulus lupulus* здесь также остается высокой – 28.

Кислотно-щелочной баланс (pH) почвы на учетных площадках из всех групп местообитаний хмеля (травянистые, антропогенные, лесные, кустарниковые, заболоченные) находится в пределах 4,3–7,2, что соответствует кислым, нейтральным и слабощелочным почвам (рис. 3, табл. 2). Для травяных сообществ (степей и лугов) характерны почвы с нейтральной и слабощелочной средой, для заболоченных – слабокислой и кислой.

Наибольшее содержание органических веществ (до 15%) наблюдается в кустарниковых сообществах благодаря накоплению органической массы опада. Наименьшее количество гумуса (1,9–6,5%) наблюдается на заболоченных местообитаниях.

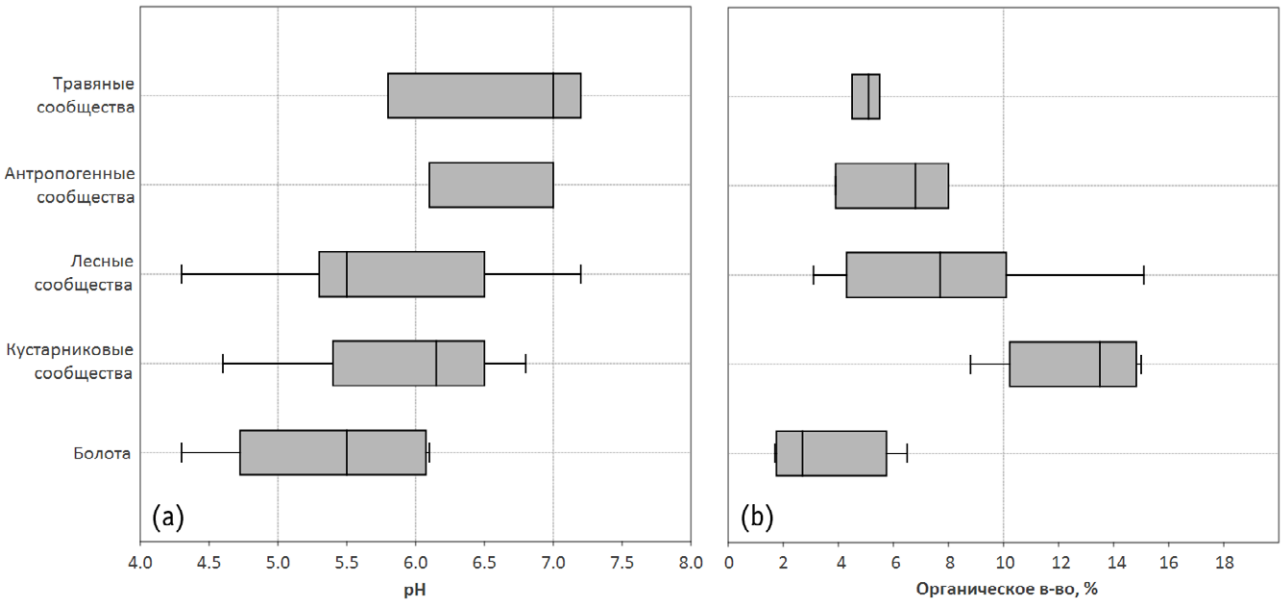


Рис. 3. **Значений pH почвенного раствора (a) и содержания органического вещества в почве из местообитаний хмеля обыкновенного, % (b)**

Fig. 3. **The pH values of soil solution (a) and the content of organic matter in the soil from common hop habitats, % (b)**

Таблица 2. Распределение диапазонов значений экологических факторов произрастания *Humulus lupulus* L. в условиях юга Западной Сибири

Table 2. Distribution of the ranges of values for the environmental factors of *Humulus lupulus* L. growth under the conditions of the south of Western Siberia

Экологические факторы / Environmental factors	Диапазон значений / Range of values
Содержание органического вещества в почве, %	1,7–15
pH почвы	4,3–7.2
Увлажнение почвы (экологическая шкала)	52–80
Богатство и засоление почвы (экологическая шкала)	10–13
Гемероботолерантность (экологическая шкала)	3–6

Обсуждение результатов

В пределах рассматриваемого фрагмента ареала хмеля обыкновенного на юге Западной Сибири выявлен широкий диапазон экологических и ценотических показателей местообитаний.

На схеме ординации большая часть анализируемых описаний образовала скопление в центре оси. Здесь сосредоточились сообщества мезофильных и гигромезофильных лесных и кустарниковых сообществ, которые являются типичными местообитаниями хмеля обыкновенного на юге Западной Сибири. Первый экологический ряд (У) на схеме ординации отражает распределение сообществ по фактору увлажнения, крайние позиции здесь занимают гигрофильные сообщества выборки – осоковые болота, сырые елово-березовые лесные ценозы, пойменные ивовые сообщества. Второй ряд – это антропогенно нарушенные сообщества (Г). В этих ценозах высока роль однолетних и двулетних видов – *Chenopodium album*, конопли посевной (*Cannabis sativa* L.), болиголова пятнистого (*Conium maculatum* L.), дескурении Софьи (*Descurainia sophia* (L.) Webb ex Prantl) и др. Относительно третьего ряда (Б-З), отражающего богатство и засоленность почвы, сосредоточились луговые степи, формирующиеся на достаточно богатых элементами питания почвах (черноземах) (см. рис. 2). В естественных сообществах, занимающих крайние позиции на оси 1, – болотах и луговых степях – хмель не является характерным видом и встречается случайно с малым проективным покрытием.

Приуроченность хмеля преимущественно к лесным и кустарниковым сообществам с умеренным и повышенным увлажнением подтверждают экологические шкалы. На градиенте увлажнения почв выборка описаний с высоким обилием хмеля (проективное покрытие – более 15%) соответствует сухо-луговому и влажно-луговому увлажнению почв, что характерно для дренированных плакорных местообитаний лесной и лесостепной зон, в более южных районах – для пойм рек, глубоких западин, балок (Guidelines for environmental..., 1974). Эти местообитания могут рассматриваться как наиболее оптимальные для развития хмеля и соответствующие его фитоценотическому оптимуму. Основной вклад в формирование сообществ с хмелем вносят ксеромезофиты и эумезофиты, составляющие 73%. Группа ксеромезофитов представлена *Poa angustifolia*, *Fragaria viridis*, *Potentilla argentea*, солонечником двуцветковым (*Galatella biflora* (L.) Nees), *Medicago falcata* и др., которые широко распространены в зональных сообществах лесостепи Западной Сибири. Эумезофиты *Cirsium setosum*, скерда сибирская (*Crepis sibirica* L.), *Dactylis glomerata*, кадения сомнительная (*Kadenia dubia* (Schkuhr) Lavrova & V.N. Tikhom.), *Urtica dioica* и др. – растения луговых и лесных ценозов. Наименьшую долю (менее 1%) составляют виды болотных местообитаний – гипогидрофиты осока острая (*Carex acuta* L.), *C. riparia*, ряска малая (*Lemna minor* L.).

Приуроченность хмеля к почвам с высоким минеральным богатством подтверждается его произрастанием совместно с растениями-нитрофилами, среди которых отмечены: *Rubus idaeus*, бузина сибирская (*Sambucus sibirica* Nakai), *Urtica dioica*, борщевик рассеченный (*Heracleum dissectum* Ledeb.), ребросемянник уральский (*Pleurospermum uralense* Hoffm.), *Aegopodium podograria*, *Prunus padus*, купырь лесной (*Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm.), яснотка белая (*Lamium album* L.), лебеда садовая (*Atriplex hortensis* L.) и др. В характеристиках хмеля как сельскохозяйственной культуры подчеркиваются его отзывчивость на хорошие физические свойства почвы (достаточная влагоемкость, благоприятные тепловой и воздушный режимы) и высокая потребность в питании: в течение вегетационного периода растения хмеля потребляют в 2–4 раза больше азота, фосфора, калия и кальция, чем зерновые культуры (Ivanov et al., 2014). В то же время массовая доля органического вещества в почве сообществ с участием хмеля колебалась от 1,5% до 15%, что свидетельствует о значительной экологической амплитуде вида.

Несмотря на широкий диапазон местообитаний хмеля, заметно ограничивает его распространение засоление почв, что подтверждается положением сообществ с его участием на градиенте богатства-засоления (ступени 10–13). Почва относится к категории засоленных, если в процессе агрохимического анализа почвы устанавливается значение массовой доли плотного остатка более 0,3%, что отмечалось на четырех мониторинговых площадках.

Особенно выделяется местообитание в заболоченном березовом травянистом лесу вблизи горько-соленого оз. Куричье (урочище Касалгач, Алтайский край). В то же время почва здесь богата органическими веществами (15%) при значениях pH, близких 5,3. Это крайняя точка местонахождения хмеля обыкновенного в природном сообществе в условиях Кулундинской бессточной котловины.

Заключение

В пределах ареала хмеля обыкновенного на юге Западной Сибири отмечается широкий диапазон экологических и ценотических характеристик местообитаний.

Результаты ординационного анализа показывают, что хмель встречается в лесных, кустарниковых, травяных, антропогенных сообществах по модифицированной классификации системы EUNIS. Преимущественную встречаемость хмеля в лесных и кустарниковых сообществах с умеренным и повышенным увлажнением подтверждают экологические шкалы. На градиенте увлажнения почв вся выборка описаний с участием хмеля занимает отрезок от 52-й до 80-й ступени. Ценозы с обилием хмеля выше 15% относятся к отрезку увлажнения от 53-й до 71-й, что соответствует сухо-луговому и влажно-луговому увлажнению почв. На градиенте богатства-засоления он охватывает диапазон 10–13-й ступени, что соответствует довольно богатым почвам. Важнейшим показателем, ограничивающим распространение хмеля в равнинной части, является засоленность почв. Диапазон кислотно-щелочного баланса (pH) почвы находится в пределах 4,3–7,2. Наибольшее содержание органических веществ (до 15%) наблюдается в кустарниковых сообществах, что связано с накоплением органической массы опада. Наименьшее количество гумуса (1,9–6,5%) наблюдается на заболоченных местообитаниях.

References / Литература

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).

Godovany A.A., Lyashenko N.I., Reytman I.G., Ezhov I.S. Hop and its utilization (Khmel i yego ispolzovaniye). Kiev: Urozhay; 1990. [in Russian] (Годованый А.А., Ляшенко Н.И., Рейтман И.Г., Ежов И.С. Хмель и его использование. Киев: Урожай; 1990).

Guidelines for environmental assessment of forage lands in the forest-steppe and steppe zones of Siberia according to vegetation (Metodicheskiye ukazaniya po ekologicheskoy otsenke kormovykh ugodiy lesostepnoy i stepnoy zon Sibiri po rastitelnomu pokrovu). Moscow: Williams Research Institute of Forages; 1974. [in Russian] (Методические указания по экологической оценке кормовых угодий лесостепной и степной зон Сибири по растительному покрову. Москва: ВНИИ кормов им. В.Р. Вильямса; 1974).

Hennekens S.M., Schaminée J.H.J. TURBOVEG, a comprehensive data base management system for vegetation data. *Journal of Vegetation Science*. 2001;12(4):589-591. DOI: 10.2307/3237010

Ivanov A., Savin I., Egorov A. Methodology of land resources assessment for agricultural production in Russia (at the example of hop cultivation). *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2014;(73):29-94. [in Russian] (Иванов А.Л., Савин И.Ю., Егоров А.В. Методология оценки ресурсного потенциала земель России для сельскохозяйственного производства (на примере хмеля). *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева*. 2014;(73):29-94). DOI: 10.19047/0136-1694-2014-73-29-94

Khlebova L.P., Brovko E.S., Bychkova O.V., Mironenko O.N., Barysheva N.V. The prevalence of viruses in hop industrial plantations in the foothills of Altai. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2022;36(12):35-39. [in Russian] (Хлебова Л.П., Бровко Е.С., Бычкова О.В., Мироненко О.Н., Барышева Н.В. Распространенность вирусов в производственных насаждениях хмеля в предгорье Алтая. *Достижения науки и техники АПК*. 2022;36(12):35-39). DOI: 10.53859/02352451_2022_36_12_35

Khlebova L.P., Brovko E.S., Mironenko O.N., Nebylitsa A.V., Poltaratskaya Yu.R. Optimisation of technology of clonal micropropagation of varietal and wild hops. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2025;39(2):38-43. [in Russian] (Хлебова Л.П., Бровко Е.С., Мироненко О.Н., Небылица А.В., Полтарацкая Ю.Р. Оптимизация технологии клонального микроразмножения сортового и дикорастущего хмеля. *Достижения науки и техники АПК*. 2025;39(2):38-43). DOI: 10.53859/02352451_2025_39_2_38

Korolyuk A.Ju. Ecological optimum of South Siberian plants. *Botanical Research of Siberia and Kazakhstan*. 2006;(12):3-38. [in Russian] (Королюк А.Ю. Экологические оптимумы растений юга Сибири. *Ботанические исследования Сибири и Казахстана*. 2006;(12):3-38).

Korpelainen H., Pietiläinen M. Hop (*Humulus lupulus* L.): traditional and present use, and future potential. *Economic Botany*. 2021;75(4):302-322. DOI: 10.1007/s12231-021-09528-1

Lavrinenko I.A. Approaches of European ecologists to typology and mapping of habitats. *Geobotanical Mapping*. 2020;(2020):51-77. [in Russian] (Лавриненко И.А. Подходы европейских экологов к типологии и картированию местообитаний. *Геоботаническое картографирование*. 2020;(2020):51-77). DOI: 10.31111/geobotmap/2020.51

Lavrinenko I.A., Lavrinenko O.V. Habitats of the East European tundra and their accordance by the EUNIS categories on the Nenetsky Reserve example. *Phytodiversity of Eastern Europe*. 2020;14(4):359-397. [in Russian] (Лавриненко И.А., Лавриненко О.В. Местообитания восточноевропейских тундр и их соотношение с категориями EUNIS на примере заповедника «Ненецкий». *Фиторазнообразие Восточной Европы*. 2020;14(4):359-397). DOI: 10.24411/2072-8816-2020-10082

Malyshev L.I. Floristic zoning based on quantitative features. *Botanicheskii zhurnal = Botanical Journal*. 1973;58(11):1581-1602. [in Russian] (Малышев Л.И. Флористическое районирование на основе количественных признаков. *Ботанический журнал*. 1973;58(11):1581-1602).

Milosta G.M., Lapa V.V. Agrobiological principles of hop cultivation in the Republic of Belarus: a monograph (Agrobiologicheskiye osnovy vyrashchivaniya khmelya v Respublike Belarus: monografiya). Grodno: Grodno State Agrarian University; 2010. [in Russian] (Милоста Г.М., Лапа В.В. Агробиологические основы выращивания хмеля в Республике Беларусь: монография. Гродно: Гродненский государственный аграрный университет; 2010).

Pereira O.R., Santos G., Sousa M.J. Hop by-products: pharmacological activities and potential application as cosmetics. *Cosmetics*. 2022;9(6):139. DOI: 10.3390/cosmetics9060139

Plants of the World Online. Kew Royal Botanic Gardens: [website]. Available from: https://powo.science.kew.org [accessed Oct. 02, 2025].

Rodwell J.S., Evans D., Schaminée J.H.J. Phytosociological relationships in European Union policy-related habitat classifications. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*. 2018;29(1):237-249. DOI: 10.1007/s12210-018-0690-y

Rossini F., Virga G., Loreti P., Iacuzzi N., Ruggeri R., Provenzano M.E. Hops (*Humulus lupulus* L.) as a novel multipurpose crop for the Mediterranean region of Europe: challenges and opportunities of their cultivation. *Agriculture*. 2021;11(6):484. DOI: 10.3390/agriculture11060484

Schaminée J.H.J., Chytrý M., Hennekens S.M., Mucina L., Rodwell J.S., Tichý L. Development of vegetation syntaxa crosswalks to EUNIS habitat classification and related data sets. Final report EEA/NSV/12/001. Amended in 2014. Wageningen: Alterra; 2014.

Silantyeva M.M., Ermakov N.B., Ovcharova N.V., Mironenko O.N. Phytocoenotic positions of *Humulus lupulus* in the low-mountain vegetation of the western part of the Altai-Sayan Mountain Region. *Turczaninowia*. 2025;28(1):187-200. [in Russian] (Силантьева М.М., Ермаков Н.Б., Овчарова Н.В., Мироненко О.Н. Фитоценотические позиции *Humulus lupulus* в растительности низкогорий западной части Алтае-Саянской горной области. *Turczaninowia*. 2025;28(1):187-200). DOI: 10.14258/turczaninowia.28.1.19

Silantyeva M.M., Mironenko O.N., Ovcharova N.V., Chukhina I.G., Poltaratskaya Yu.R., Nebylitsa A.V. et al. Phytocenotic arrangement of the common hop in the south of Western Siberia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(4):20-31. [in Russian] (Силантьева М.М., Мироненко О.Н., Овчарова Н.В., Чухина И.Г., Полтарацкая Ю.Р., Небылица А.В. и др. Фитоценотическая приуроченность хмеля обыкновенного на юге Западной Сибири. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(4):20-31). DOI: 10.30901/2227-8834-2024-4-20-31

Smelyansky I.E., Pronkina G.A. (eds). Important plant areas of Altai-Sayan ecoregion: attempt of identification (Klyuchevye botanicheskiye territorii Altaye-Sayanskogo ekoregiona: opyt vydeleniya). Novosibirsk: Geo; 2009. [in Russian] (Ключевые ботанические территории Алтае-Саянского экорегиона: опыт выделения / под ред. И.Э. Смелянского, Г.А. Пронькиной. Новосибирск: Гео; 2009).

Zverev A.A. Information technologies in the studies of vegetation (Informatsionnye tekhnologii v issledovaniyakh rastitelnogo pokrova). Tomsk: TML-Press; 2007. [in Russian] (Зверев А.А. Информационные технологии в исследованиях растительного покрова: Томск: ТМЛ-пресс; 2007).

Zverev A.A., Sheremetova S.A., Sheremetov R.T. Plant indicator values of tolerability for hemeroby as an analytical tool for floristic data using the basin approach. In: A.N. Kupriyanov (ed.). *Problems of Industrial Botany in Advanced Industrial Regions. Proceedings of the V International Conference (2–3 October 2018, Kemerovo)*. Kemerovo; 2018. p.20-26. [in Russian] (Зверев А.А., Шереметова С.А., Шереметов Р.Т. Шкала гемероботолерантности растений как инструмент для анализа флористических данных в рамках бассейнового подхода. В кн.: *Проблемы промышленной ботаники индустриально развитых регионов. Сборник материалов докладов V Международной конференции (2–3 октября 2018 г., Кемерово)* / под ред. А.Н. Куприянова. Кемерово; 2018. С.20-26).

Информация об авторах

Наталья Владимировна Овчарова, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Алтайский государственный университет, 656049 Россия, Барнаул, пр. Ленина, 61, ovcharova_n_w@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8657-3226

Ирина Сергеевна Чупина, младший научный сотрудник, Центральный сибирский ботанический сад Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Россия, Новосибирск, ул. Золотодолинская, 101, irachupina@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6475-056X

Марина Михайловна Силантьева, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Алтайский государственный университет, 656049 Россия, Барнаул, пр. Ленина, 61, msilan@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7102-2675

Ольга Николаевна Мироненко, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Алтайский государственный университет, 656049 Россия, Барнаул, пр. Ленина, 61, olgmironenko@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0091-5043

Information about the authors

Natalia V. Ovcharova, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Altai State University, 61 Lenina Ave., Barnaul 656049, Russia, ovcharova_n_w@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-8657-3226

Irina S. Chupina, Associate Researcher, Central Siberian Botanical Garden of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 101 Zolotodolinskaya St., Novosibirsk 630090, Russia, irachupina@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6475-056X

Marina M. Silantyeva, Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, Altai State University, 61 Lenina Ave., Barnaul 656049, Russia, msilan@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-7102-2675

Olga N. Mironenko, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Altai State University, 61 Lenina Ave., Barnaul 656049, Russia, olgmironenko@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0091-5043

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 14.10.2025; одобрена после рецензирования 18.02.2026; принята к публикации 16.04.2026.
The article was submitted on 14.10.2025; approved after reviewing on 18.02.2026; accepted for publication on 16.04.2026.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Краткое сообщение
УДК 631.527:633.11
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o15

CC BY

Пополнение активной коллекции ВИР для селекции яровой мягкой пшеницы в Центрально-Черноземной зоне России

В. А. Лосева[1], А. Н. Брыкова[2], Е. В. Зуев[2]

[1] *Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Екатерининская опытная станция – филиал ВИР, Тамбовская область, Россия*

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

Автор, ответственный за переписку: Евгений Валерьевич Зуев, e.zuev@vir.nw.ru

Для выполнения задач селекции яровой мягкой пшеницы в Центрально-Черноземной зоне РФ служит коллекция ВИР, которая содержит 16 800 образцов в основном каталоге. Адресный подбор исходного материала и предоставление семян из постоянно пополняемого активного хранения осуществляется за счет темы НИР «Активная коллекция сельскохозяйственных растений как основа обеспечения селекционных и исследовательских программ Российской Федерации качественным исходным материалом и моделями для сравнительных исследований».
Представлен анализ данных полевого изучения образцов яровой мягкой пшеницы, полученных на Екатерининской опытной станции ВИР с 1970 по 2025 г., с целью подбора для заявок наиболее актуальных образцов (источников селекционно ценных признаков). В связи с меняющимися климатическими условиями более подробно описан период с 2020 по 2025 г. За это время оценены 514 сортов и линий яровой мягкой пшеницы и выявлено 82 образца – источника селекционно ценных признаков. В работе описаны источники крупнозерности, скороспелости, устойчивости к мучнистой росе и бурой ржавчине, урожайности, устойчивости к полеганию и с комплексом признаков. В итоге 51 источник был отправлен по заявкам в 22 бюджетных учреждения России. В целом за период 2020–2025 гг. по заявкам НИУ предоставлены 2109 образцов яровой мягкой пшеницы, в том числе в селекцентры отправлены 280 образцов из числа новых поступлений, 361 источник хозяйственно ценных признаков и 366 прочих коллекционных образцов.

Ключевые слова: *Triticum aestivum* L., селекционно ценные признаки, активная коллекция, селекционные центры России

Благодарности: настоящая статья подготовлена в рамках реализации темы НИР «Активная коллекция сельскохозяйственных растений как основа обеспечения селекционных и исследовательских программ Российской Федерации качественным исходным материалом и моделями для сравнительных исследований» (FGEM-2025-0009).
Авторы благодарят доктора биологических наук, члена-корреспондента РАН Елену Константиновну Хлесткину за ценные замечания и обсуждение в ходе подготовки работы.

Для цитирования: Лосева В.А., Брыкова А.Н., Зуев Е.В. Пополнение активной коллекции ВИР для селекции яровой мягкой пшеницы в Центрально-Черноземной зоне России. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(2):217-225. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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.

© Лосева В.А., Брыкова А.Н., Зуев Е.В., 2026

BRIEF REPORTS

Brief report
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o15

Expansion of the active collection of spring bread wheat at VIR for breeding in the Central Black Earth Region of Russia

Valentina A. Loseva[1], Alla N. Brykova[2], Evgeny V. Zuev[2]

[1] N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Yekaterinino Experiment Station – branch of VIR, Tambov Province, Russia

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

Corresponding author: Evgeny V. Zuev, e.zuev@vir.nw.ru

The VIR collection contains 16,800 spring bread wheat accessions and is used by wheat breeders for crop improvement in the Central Black Earth Region of Russia. VIR carries out targeted selection of source material and provision of high-quality seeds from the collection in the framework of the project entitled "The active collection of agricultural plants as a basis for supplying breeding and research programs of the Russian Federation with high-quality source material and models for comparative studies" (FGEM-2025-0009).
Field study data were analyzed for spring bread wheat accessions obtained at Yekaterinino Experiment Station of VIR from 1970 through 2025. The goal was to select sources of most important traits requested by breeders. Due to the changing climatic conditions, the period from 2020 to 2025 is described in more detail. During this time span, 514 spring bread wheat cultivars and lines were evaluated, and 82 sources of traits valuable for breeding were identified, including those with high 1000-grain weight, earliness, field resistance to powdery mildew and leaf rust, high yield, lodging resistance, and combinations of these traits. Ultimately, 51 sources were supplied to 22 Russian budgetary institutions. Overall, from 2020 through 2025, 2,109 spring bread wheat accessions were dispatched to research institutes, including 280 new acquisitions, 361 sources of valuable traits, and 366 other accessions sent to breeding centers.

Keywords: *Triticum aestivum* L., valuable breeding traits, active collection, Russian breeding centers

Acknowledgments: this publication was prepared within the framework of the research topic "The active collection of agricultural plants as a basis for supplying breeding and research programs of the Russian Federation with high-quality source material and models for comparative studies" (FGEM-2025-0009).
The authors are grateful to Dr. Elena K. Khlestkina, Corresponding Member of the RAS, for her valuable remarks and comments during the preparation of this manuscript.

For citation: Loseva V.A., Brykova A.N., Zuev E.V. Expansion of the active collection of spring bread wheat at VIR for breeding in the Central Black Earth Region of Russia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(2):217-225. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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.

В Центрально-Черноземной зоне (ЦЧЗ) России хорошо развито зерновое производство. В регионе яровая мягкая пшеница (*Triticum aestivum* L.) является страховой культурой на случай гибели озимой пшеницы, которая в неблагоприятные для перезимовки годы погибает на значительных площадях (до 50%), а в засушливые осенние периоды площади под ней резко сокращаются. Чтобы иметь стабильные валовые сборы продовольственного зерна, яровая пшеница должна возделываться в озимосеющих районах, куда входит ЦЧЗ. В Центральном Черноземье урожайность яровой пшеницы составляет 18–20 ц/га (Turusov et al., 2019), однако в отдельные годы урожайность достигает 45,4 ц/га (https://rosstat.gov.ru).

В ЦЧЗ входят 6 областей: Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая, Орловская, Тамбовская. В 2024 г., по данным Росстат (https://rosstat.gov.ru), яровая пшеница в зоне высевалась на площади 682 490 га (5,5% от общей площади по России), валовый сбор в 2023 г. составил 5 144 050 т (17,7% от общего урожая в РФ).

В зоне к использованию в 2025 г. допущены 23 сорта яровой мягкой пшеницы (https://www.gossortrf.ru).

Селекционными учреждениями региона созданы 6 сортов: ‘Воронежская 12’, ‘Воронежская 18’, ‘Крестьянка’, ‘Черноземноуральская 2’ (Воронежский ФАНЦ им. В.В. Докучаева), ‘Дарья’ (ФНЦ зернобобовых, крупяных культур и Липецкая сортоиспытательная станция, Институт земледелия и селекции НАН Беларуси), ‘Курская 2038’ (Курский ФАНЦ и Воронежский ФАНЦ им. В.В. Докучаева). Относительно новыми являются сорта ‘Дарья’ (включен в Госреестр в 2006 г.), ‘Черноземноуральская 2’ (2013), ‘Воронежская 18’ (2017). Остальные сорта находятся в производстве 28–34 года.

Следующая группа допущенных к использованию сортов – селекционные достижения селекцентров из других регионов: ‘Йолдыз’, ‘Экада 109’ (Казанский АНЦ), ‘Курьер’ (НЦЗ им. Лукьяненко), ‘Прохоровка’, ‘Фаворит’ (ФАНЦ Юго-Востока), ‘Симбирцит’, ‘Тулайковская 10’, ‘Ульяновская 115’ (Самарский ФИЦ). Эта группа сортов была включена в Госреестр с 2003 по 2015 г., за исключением сорта ‘Прохоровка’ – 1996 г. и сорта ‘Ульяновская 115’ – 2025 г.

И, наконец, третья группа – 9 сортов зарубежной селекции: ‘Арабелла’ (Польша), ‘Гранни’ (Австрия), ‘КВС Аквилон’ (Германия), ‘КВС Торридон’ (Великобритания), ‘Корнетто’ (Франция), ‘Ликамеро’ (Франция), ‘Одета’ (Чехия), ‘Токката’ (Чехия), ‘Тризо’ (Германия).

Большинство иностранных сортов включены в Госреестр в период с 2015 по 2020 г.

Потребность увеличения яровых сортов пшеницы в производстве в ЦЧЗ в пользу отечественных конкурентоспособных сортов представляет вызов для российских селекцентров, как функционирующих непосредственно в Черноземье, так и действующих в других регионах, но уделяющих внимание селекции сортов для данной зоны возделывания.

Основными задачами селекции яровой мягкой пшеницы в ЦЧЗ являются: создание засухоустойчивых и жаростойких сортов, обладающих высокой и стабильной урожайностью, устойчивостью к полеганию и поражению наиболее вредоносными болезнями и вредителями; повышение адаптивности к абиотическим факторам благодаря быстрому росту в начальный период вегетации и продолжительности работы листового аппарата; улучшение показателей густоты продуктивного стеблестоя на 1 м^2, озерненности колоса в сочетании с высокими показателями качества зерна (Malokostova, 2018).

Для достижения этих целей основой служит коллекция ВИР. Адресный подбор исходного материала и предоставление семян из постоянно пополняемого активного хранения осуществляется за счет темы НИР «Активная коллекция сельскохозяйственных растений как основа обеспечения селекционных и исследовательских программ Российской Федерации качественным исходным материалом и моделями для сравнительных исследований». Анализ и обобщение данных по селекционно ценным признакам для яровой мягкой пшеницы, полученных в условиях ЦЧЗ, – инструмент, облегчающий подбор для заявок НИУ наиболее актуальных источников из масштабной коллекции ВИР (более 16 тыс. образцов данной культуры).

В ЦЧЗ РФ (Тамбовская обл., с. Екатеринино) расположена Екатерининская опытная станция – филиал ВИР (Екатерининская ОС ВИР), на которой с 1970 г. проводятся полевые исследования яровой мягкой пшеницы по методике ВИР (Merezhko et al., 1999).

Результаты полевого изучения образцов яровой мягкой пшеницы в условиях Тамбовской области с 1980 по 1999 г. по отдельным агрономическим характеристикам ранее были представлены в каталогах ВИР (Komarov et al., 1986; Komarov et al., 1987; Zuev et al., 1999; Khakimova et al., 1999). Также опубликованы данные за период с 1988 по 2009 г. (Zuev et al., 2013), с 1970 по 2016 г. (Zuev et al., 2017) и с 2018 по 2021 г. (Loseva et al., 2021).

За период с 1970 по 2019 г. имеется информация о данных полевого изучения на Екатерининской ОС ВИР для 4549 образцов яровой мягкой пшеницы из 81 страны. За это время активная коллекция яровой мягкой пшеницы в ВИР пополнилась 435 образцами, являющимися источниками селекционно ценных признаков (Zuev et al., 2017; Loseva et al., 2021) (табл. 1). Вместе с тем, ввиду меняющихся климатических условий, огромный интерес представляет анализ и обобщение данных за период 2020–2025 гг.

В этот период на Екатерининской ОС ВИР изучили 514 образцов яровой мягкой пшеницы различного географического происхождения (см. табл. 1). По сравнению с 1970–2019 гг. в изучении уже отсутствовали образцы из Закавказья и Юго-Западной Азии. В большей степени были представлены также российские и европейские сорта. Всего выявлено 82 источника селекционно ценных признаков (табл. 2).

Наибольшее количество источников выявлено по признакам урожайности (особенно в 2022–2024 гг.), крупнозерности (особенно в 2023–2025 гг.), скороспелости, устойчивости к бурой ржавчине и мучнистой росе (см. табл. 2).

Ниже приводим список выявленных источников:

– крупнозерность: ‘Тарская Юбилейная’ (к-67549, РФ, Омская обл.), ‘KWS W374’ (к-67571, Великобритания), ‘Бия 21’ (к-67748, РФ, Алтайский край), ‘Mahon Demias’ (к-67917, Алжир), к-67921 (Алжир), ‘Triple Dirk D’ (к-67922, Австралия), ‘Tekira’ (к-67951, Турция), ‘Wren’ (к-67987, Кения), ‘Бобо 80’ (к-68510, Таджикистан), ‘Среднерусская’ (к-69251, РФ, Тамбовская обл.);

– крупнозерность, скороспелость: ‘CDC Rama’ (к-67835, Канада);

– крупнозерность, скороспелость, урожайность: ‘Cemre’ (к-67813, Турция);

– крупнозерность, урожайность: Л 111 (к-69253, РФ, Курганская обл.);

Таблица 1. **Происхождение изученных образцов яровой мягкой пшеницы и выявленных источников селекционно ценных признаков**

Table 1. **Origin of the studied spring bread wheat accessions and identified sources of traits valuable for breeding**

Регион / Страна	Число образцов			
	изученных с 1970 по 2019 г.	источников с 1970 по 2019 г.	изученных с 2020 по 2025 г.	источников с 2020 по 2025 г.
Австралия и Новая Зеландия	221	10	2	1
Африка	136	13	26	5
Европа	839	129	77	27
Закавказье	12	1	–	–
Малая Азия и Ближний Восток	76	3	16	4
Россия	1292	143	313	22
Северная Америка	643	50	41	14
Центральная Азия	678	27	31	9
Юго-Западная Азия	113	13	–	–
Южная Америка	527	44	6	–
Неизвестно	12	2	2	–
Всего	4549	435	514	82

Таблица 2. **Число выявленных источников селекционно ценных признаков на Екатерининской опытной станции ВИР (2020–2025 гг.)**

Table 2. **Number of identified sources of traits valuable for breeding at Yekaterinino Experiment Station of VIR (2020–2025)**

Признак	Периоды трехлетнего изучения наборов пшеницы				Всего за 2020–2025 гг.
	2020–2022 гг.	2021–2023 гг.	2022–2024 гг.	2023–2025 гг.	
крупнозерность	–	1	3	6	10
крупнозерность, скороспелость	1	–	–	–	1
крупнозерность, скороспелость, урожайность	1	–	–	–	1
крупнозерность, урожайность	–	–	–	1	1
крупнозерность, урожайность, устойчивость к бурой ржавчине	–	–	–	1	1
крупнозерность, устойчивость к мучнистой росе	–	–	–	1	1
крупнозерность, устойчивость к полеганию	–	1	–	–	1
скороспелость	4	4	3	3	14
скороспелость, урожайность	–	–	1	–	1
скороспелость, устойчивость к бурой ржавчине	1	–	–	–	1
скороспелость, устойчивость к мучнистой росе	2	2	–	–	4
скороспелость, устойчивость к полеганию	–	–	–	2	2

Таблица 2. Окончание
Table 2. The end

Признак	Периоды трехлетнего изучения наборов пшеницы				Всего за 2020–2025 гг.
	2020–2022 гг.	2021–2023 гг.	2022–2024 гг.	2023–2025 гг.	
урожайность	1	1	6	2	10
урожайность, устойчивость к бурой ржавчине	1	–	–	–	1
урожайность, устойчивость к бурой ржавчине, устойчивость к мучнистой росе	1	–	–	–	1
урожайность, устойчивость к мучнистой росе	1	–	1	1	3
урожайность, устойчивость к полеганию	–	2	–	–	2
устойчивость к бурой ржавчине	1	2	4	2	9
устойчивость к мучнистой росе	3	1	3	2	9
устойчивость к мучнистой росе, устойчивость к полеганию	–	–	2	–	2
устойчивость к полеганию	–	1	2	4	7
Всего	17	15	25	25	82

– крупнозерность, урожайность, устойчивость к бурой ржавчине: ‘Mv Pirkadat’ (к-68515, Венгрия);

– крупнозерность, устойчивость к мучнистой росе: ‘RGT Pistolo’ (к-68520, Испания);

– крупнозерность, устойчивость к полеганию: ‘Горч’ (к-68508, Афганистан);

– скороспелость: Рифор 2 (к-67249), Рифор 3 (к-67250), Рифор 8 (к-67254), Римакс (к-67257), Рифор 11 (к-67802), Рифор 12 (к-67803), Рифор 13 (к-67804) – все из РФ, Ленинградская обл., ‘Alkama’ (к-67929, Мали), к-67936 (Малави), FHB 51944 (к-67945, РФ), ‘CDC Go’ (к-67954), ‘Somerset’ (к-67955), ‘CDC Kernen’ (к-67957), ‘CDC Plentiful’ (к-67958) – все из Канады;

– скороспелость, урожайность: ‘Cancian’ (к-67558, Германия);

– скороспелость, устойчивость к бурой ржавчине: ‘CDC Osler’ (к-67953, Канада);

– скороспелость, устойчивость к мучнистой росе: Рифор 7 (к-67253, РФ, Ленинградская обл.), Рифор 10 (к-67256, РФ, Ленинградская обл.), CDL Sr31 Sr36 (к-68159, США), CDL Sr24 Sr36 (к-68160, США);

– скороспелость, устойчивость к полеганию: ‘Amit’ (к-68946, Израиль), ‘Aviv’ (к-68947, Израиль);

– урожайность: ‘KWS Sharki’ (к-67471), РУС 20 7006 (к-67475), KW 360 2 17 (к-67563) – все из Германии, ‘Эпония’ (к-67564, Чехия), ‘Kostanai’ (к-67569, Швейцария), ‘Тингер’ (к-67753, РФ, Тюменская обл.), ‘CDC VR Morris’ (к-67959, Канада), ‘Itaka’ (к-68162, Польша), ‘Норман’ (к-68512, Таджикистан), ‘Voskovka’ (к-68958, Словакия);

– урожайность, устойчивость к бурой ржавчине: RL 7917 (к-67976, РФ, Тамбовская обл.;

– урожайность, устойчивость к бурой ржавчине, устойчивость к мучнистой росе: ‘AAC Brandon’ (к-67961, Канада);

– урожайность, устойчивость к мучнистой росе: ‘КВС Карузум’ (к-67562, Германия), ‘CDC Primepurple’ (к-67960, Канада), ‘PS Perlicka’ (к-68529, Словакия);

– урожайность, устойчивость к полеганию: ‘Блудон’ (к-68507, Афганистан), ‘Шумой’ (к-68511, Таджикистан);

– устойчивость к бурой ржавчине: ‘Niveau’ (к-67559, Франция), ‘Квартет’ (к-67750, РФ, Саратовская обл.), ‘Сигма 5’ (к-67755, РФ, Омская обл.), ‘Уралосибирская 3’ (к-67756, РФ, Омская обл.), ‘Torocahui S 2004’ (к-67930, Мексика), ‘Niord BW II’ (к-67988, Швеция), Е-607 (к-68156, Казахстан), ‘Из-80’ (к-68509, Таджикистан), ‘Ауреум 990’ (к-69482, РФ, Самарская обл.);

– устойчивость к мучнистой росе: Рифор 9 (к-67255, РФ, Ленинградская обл.), ‘Kapitol’ (к-67567, Германия), ‘Demonstrant’ (к-67966, Норвегия), ‘Rospuda’ (к-67967, Польша), St.10/10 (к-67974, РФ, Тамбовская обл.), Nugaines NIL (Vrn3) (к-67983, США), ‘Экада 85’ (к-68154, Казахстан), ‘Jarlanka’ (к-68524, Польша), ‘WPB Duncan’ (к-68527, Нидерланды);

– устойчивость к мучнистой росе, устойчивость к полеганию: ‘SU Ahab’ (к-67472), ‘Jasmund’ (к-67560) – из Германии;

– устойчивость к полеганию: ‘Chirya 1’ (к-67934, Мексика), ‘Bjarne’ (к-67952, Швеция), ‘Lotte’ (к-67969, Чехия), ‘Caral’ (к-67971, Швейцария), ‘Истикбол’ (к-68513, Таджикистан), ‘Palesio’ (к-68522, Италия), ‘Badiel’ (к-68948, Испания).

Именно эти источники в первую очередь предлагаются для выполнения текущих заявок от селекцентров.

Вместе с тем интерес представляет анализ заявок, поступавших в последние 5 лет. Он позволяет увидеть тренды формирования селекционных программ и основные задачи, которые ставят перед собой отечественные селекцентры. Такой анализ позволяет и ВИР, как биоре-

сурсному центру, в дальнейшем более адресно реагировать на запросы.

Ежегодно отдел генетических ресурсов пшеницы ВИР выполняет поступившие заявки и договоры из селекцентров и НИУ РФ. С 2020 по 2025 г. в бюджетные учреждения России предоставлены 2109 образцов / 4544 единицы хранения (пакетообразца) яровой мягкой пшеницы. В селекцентры отправлены 280 образцов / 2611 пакетообразцов из числа новых поступлений, 361 образец / 372 пакетообразца – источников хозяйственно ценных признаков и 366 прочих коллекционных образцов (табл. 3, рисунок). Из таблицы 3 можно увидеть резко повысившийся спрос в 2025 г. на источники хозяйственно ценных признаков.

филиал ФИЦ ИЦиГ СО РАН, Татарский НИИСХ – обособленное структурное подразделение ФИЦ «Казанский научный центр РАН», Ульяновский НИИСХ – филиал Самарского научного центра РАН, ФНЦ агробитехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки. Единичные заявки за период 2020–2025 гг. поступали из АФИ, Воронежского ФАНЦ им. В.В. Докучаева, Дальневосточного НИИСХ, Ершовской ОС – филиала ФАНЦ Юго-Востока, Кемеровского НИИСХ – филиала СФНЦА РАН, Курганского НИИСХ – филиала УрФАНИЦ УрО РАН, Нижегородского ГУ, Омского ГАУ.

В таблице 4 приведено число источников, выявленных на Екатерининской ОС ВИР в период 2020–2025 гг. и переданных в селекцентры и НИУ России. Из 82 источ-

Таблица 3. Рассылка дубликатов образцов/пакетообразцов яровой мягкой пшеницы из коллекции ВИР в бюджетные учреждения России по их заявкам (2020–2025 гг.)

Table 3. Distribution of duplicate seed samples/packets of spring bread wheat from the VIR collection to budgetary institutions of Russia upon their requests (2020–2025)

Рассылка	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.	2025 г.	2020–2025 гг.
Селекцентры (новые образцы)	50/521	50/450	50/500	50/440	30/300	50/400	280/2611
Селекцентры (источники хозяйственно ценных признаков)	10	83	55	46	20/31	147	361/372
Селекцентры (прочие коллекционные образцы)	–	51	107	90	66	52	366
Другие НИУ	392	40	149/242	69	70	382	1102/1195
Всего разослано	452/923	224/624	361/904	255/645	186/467	631/981	2109/4544

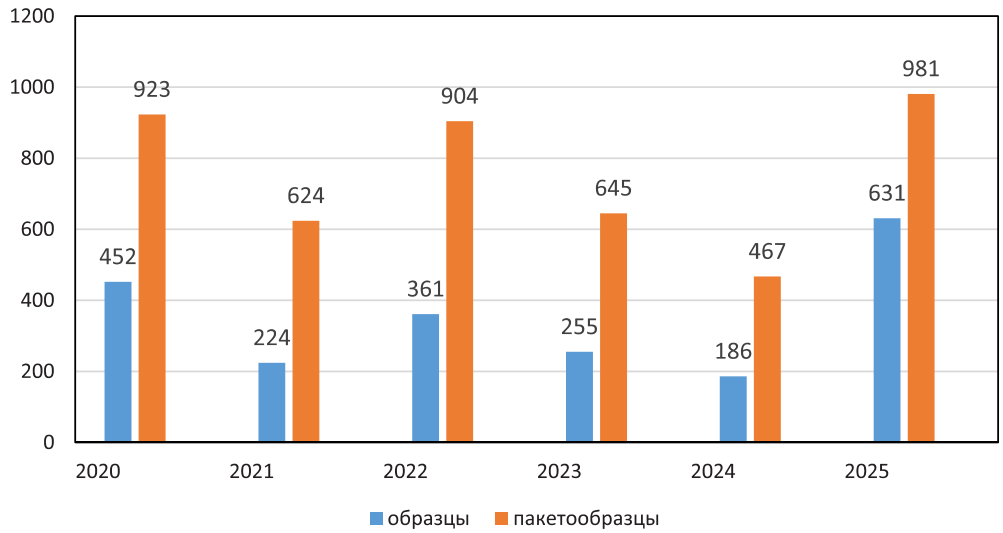


Рисунок. Рассылка материалов образцов/пакетообразцов яровой мягкой пшеницы из коллекции ВИР в бюджетные научные учреждения и вузы России по их заявкам (2020–2025 гг.)

Figure. Distribution of seed samples/packets of spring bread wheat from the VIR collection to budgetary scientific institutions and universities in Russia upon their requests (2020–2025)

В 10 учреждений России образцы яровой мягкой пшеницы отправляются ежегодно: ВИЗР, ВНИИФ, Дальневосточный ГАУ, Омский АНЦ, Поволжский НИИСС – филиал Самарского научного центра РАН, Самарский НИИСХ – филиал Самарского научного центра РАН, СибНИИРС –

ников дубликаты 51 были разосланы, что составляет 61% от общего их числа. Из селекцентров, расположенных в ЦЧЗ России, поступали единичные заявки на образцы яровой мягкой пшеницы, в связи с этим им было предоставлено всего 5 источников. Другая картина ха-

Таблица 4. Рассылка источников хозяйственно ценных признаков яровой мягкой пшеницы в селекцентры и НИУ России (2020–2025 гг.)

Table 4. Distribution of identified sources of traits valuable for spring bread wheat breeding to breeding centers and research institutes of Russia (2020–2025)

НИУ	Число отправленных источников
Белгородский ГАУ	4
ВИЗР	6
ВНИИФ	29
Воронежский ФАНЦ им. В.В. Докучаева	1
Дальневосточный ГАУ	13
Кемеровский НИИСХ – филиал СФНЦА РАН	10
Курганский НИИСХ – филиал УрФАНИЦ УрО РАН	7
Ленинградский НИИСХ «Белогорка» – филиал ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха	14
НИИСХ Северного Зауралья – филиал ТюмНЦ СО РАН	15
Омский АНЦ	26
Поволжский НИИСС – филиал Самарского научного центра РАН	27
Прикаспийский аграрный ФНЦ	3
Самарский НИИСХ – филиал Самарского научного центра РАН	33
Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова	6
СибНИИРС – филиал ФИЦ ИЦиГ СО РАН	32
Татарский НИИСХ – обособленное структурное подразделение ФИЦ «Казанский научный центр РАН»	33
Удмуртский НИИСХ – филиал Удмуртского ФИЦ УрО РАН	27
Ульяновский НИИСХ – филиал Самарского научного центра РАН	32
Уральский НИИСХ – филиал УрФАНИЦ УрО РАН	6
ФНЦ агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки	3
ФНЦ биологической защиты растений	21
Якутский НИИСХ – обособленное подразделение ФИЦ ЯНЦ СО РАН	7

рактерна для селекционных учреждений из других зон, сорта которых рекомендованы для выращивания в ЦЧЗ. Самое большое число источников хозяйственно ценных признаков передано в Самарский НИИСХ, Татарский НИИСХ, Ульяновский НИИСХ (см. табл. 4). Вышеперечисленные селекцентры присылают заявки на новые поступления в коллекцию ВИР, и отдел генетических ресурсов пшеницы по собственной инициативе формирует список отправляемых образцов.

Заключение

В результате анализа оценочных данных полевого изучения яровой мягкой пшеницы в условиях Тамбовской области в 2020–2025 гг. активная коллекция ВИР пополнена 82 источниками хозяйственно ценных признаков, 59 из которых разосланы по заявкам в 22 селекцентра и НИУ России. Вместе с тем интерес представляет анализ заявок, поступавших в последние 5 лет. Он позволяет увидеть тренды формирования селекционных программ и основные задачи, которые ставят перед собой отечественные селекцентры. Такой анализ позволяет ВИР, как биоресурсному центру, в дальнейшем более адресно реагировать на запросы. Надеемся, что данная статья активизирует запросы селекцентров ЦЧЗ на источники из коллекции ВИР, и Государственный реестр сортов РФ пополнится новыми конкурентноспособными российскими сортами яровой мягкой пшеницы для Центрально-Черноземного региона.

References / Литература

Federal State Statistics Service (Rosstat): [website]. [in Russian] (Федеральная служба государственной статистики (Росстат): [сайт]). URL: https://rosstat.gov.ru [дата обращения: 10.02.2026].

Khakimova A.G., Zuev E.V., Brykova A.N., Klementyeva N.F., Chmeleva Z.V., Nikiforov M.N. Catalogue of the VIR global collection. Issue 698. Wheat. Complex assessment of spring bread wheat accessions promising for grain quality in the Central Black Earth Region of Russia (Kompleksnaya otsenka perspektivnykh po kachestvu zerna obraztsov yarovoy myagkoy pshenitsy v usloviyakh Tsentralno-Chernozemnogo rayona Rossii). St. Petersburg: VIR; 1999. [in Russian] (Хакимова А.Г., Зуев Е.В., Брыкова А.Н., Клементьева Н.Ф., Чмелева З.В., Никифоров М.Н. Каталог мировой коллекции ВИР. Выпуск 698. Пшеница. Комплексная оценка перспективных по качеству зерна образцов яровой мягкой пшеницы в условиях Центрально-Черноземного района России. Санкт-Петербург: ВИР; 1999).

Komarov V.I., Nikiforova N.F., Kuzin I.G., Udachin R.A., Kudryavtseva Z.V., Nikiforov M.N., Medvedeva L.M., Chmeleva Z.V., Dashkevich N.A. List of spring wheat accessions with agronomic, biological and technological traits for the conditions of the Central Black Earth Region and the Central Region of the Non-Black-Soil Zone of the RSFSR (Perechen obraztsov yarovoy pshenitsy s khozyaystvenno-biologicheskimi i tekhnologicheskimi priznakami v usloviyakh TsChR i Tsentralnogo rayona Nechernozemnoy zony RSFSR). Leningrad: VIR; 1987. [in Russian] (Комаров В.И., Никифорова Н.Ф., Кузин И.Г., Удачин Р.А., Кудрявцева З.В., Никифоров М.Н., Медведева Л.М., Чмелева З.В., Дашкевич Н.А. Перечень образцов яровой пшеницы с хозяйственно-биологическими и технологическими признаками в условиях ЦЧР и Центрального района Нечерноземной зоны РСФСР. Ленинград: ВИР; 1987).

Komarov V.I., Nikiforova N.F., Stepanova G.I., Udachin R.A., Razumova I.I., Chmeleva Z.V. List of spring bread wheat accessions from the VIR global collection with high technological characteristics of grain (Perechen obraztsov myagkoy yarovoy pshenitsy iz mirovoy kollektsii VIR s vysokimi tekhnologicheskimi svoystvami zerna). Leningrad: VIR; 1986. [in Russian] (Комаров В.И., Никифорова Н.Ф., Степанова Г.И., Удачин Р.А., Разумова И.И., Чмелева З.В. Перечень образцов мягкой яровой пшеницы из мировой коллекции ВИР с высокими технологическими свойствами зерна. Ленинград: ВИР; 1986).

Loseva V.A., Temirbekova S.K., Novikova L.Yu., Brykova A.N., Kudryavtseva E.Yu., Zuev E.V. Results of a spring soft wheat samples field study from the newest additions to the VIR collection in the Central Black Earth Region of the Russian Federation conditions. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2021;(5):4-10. [in Russian] (Лосева В.А., Темирбекова С.К., Новикова Л.Ю., Брыкова А.Н., Кудрявцева Е.Ю., Зуев Е.В. Результаты полевого изучения образцов яровой мягкой пшеницы из новейших поступлений в коллекцию ВИР в условиях Центрально-Черноземного региона РФ. *Вестник сельскохозяйственной науки*. 2021;(5):4-10). DOI: 10.30850/vrsn/2021/5/4-10

Malokostova E.I. A new spring soft wheat variety 'Voronezhskaya 18' for the Central-Blackearth Region. *Grain Economy of Russia*. 2018;3(57):59-63. [in Russian] (Малокостова Е.И. Воронежская 18 – новый сорт яровой мягкой пшеницы для Центрально-Черноземной зоны. *Зерновое хозяйство России*. 2018;3(57):59-63). DOI: 10.31367/2079-8725-2018-57-3-59-63

Merezhko A.F., Udachin R.A., Zuev E.V., Filatenko A.A. Serbin A.A., Lyapunova O.A., Kosov V.Yu., Kurkiev U.K., Okhotnikova T.V., Navruzbekov N.A., Boguslavskiy R.L., Abdulaeva A.K., Chikida N.N., Mitrofanova O.P., Potokina S.A. Replenishment, preservation in living form and study of the world collection of wheat, *Aegilops* and triticale: guidelines (Popolneniye, sokhraneniye v zhivom vide i izucheniye mirovoy kollektsii pshenitsy, egilopsa i tritikale: metodicheskiye ukazaniya). A.F. Merezhko (ed.). St. Petersburg: VIR; 1999. [in Russian] (Мережко А.Ф., Удачин Р.А., Зуев Е.В., Филатенко А.А., Сербин А.А., Ляпунова О.А., Косов В.Ю., Куркиев У.К., Охотникова Т.В., Наврузбеков Н.А., Богуславский Р.Л., Абдулаева А.К., Чикида Н.Н., Митрофанова О.П., Потокина С.А. Пополнение, сохранение в живом виде и изучение мировой коллекции пшеницы, эгилопса и тритикале: методические указания / под ред. А.Ф. Мережко. Санкт-Петербург: ВИР; 1999).

State Commission of the Russian Federation for Testing and Protecting Selection Achievements: [website]. [in Russian] (Государственная комиссия Российской Федерации по испытанию и охране селекционных достижений: [сайт]). URL: https://gossortrf.ru [дата обращения: 10.02.2026].

Turusov V.I., Novichikhin A.M., Malokostova E.I., Nuzhnaya N.A., Chernykh A.V. Technology of spring wheat cultivation in the Central Black Soil Region (Tekhnologiya vozdelyvaniya yarovoy pshenitsy v TsChZ). Kamennaya Step; 2019. [in Russian] (Турусов В.И., Новичихин А.М., Малокостова Е.И., Нужная Н.А., Черных А.В. Технология возделывания яровой пшеницы в ЦЧЗ. Каменная Степь; 2019).

Zuev E.V., Lyapunova O.A., Brykova A.N., Surganova L.D., Nikiforov M.N., Razumova I.I., Plotnikova L.N., Potokina S.A., Borodina R.A., Ivanova O.A., Kozhushko N.N., Zhukova A.Z., Chmeleva Z.V., Klimentyeva N.F. Catalogue of the VIR global collection. Issue 708. The pattern of variability in early-ripening spring bread wheat accessions under various ecogeographic conditions (Kharakter izmenchivosti skorospelykh obraztsov yarovoy myagkoy pshenitsy v razlichnykh ekologo-geograficheskikh usloviyakh). St. Petersburg: VIR; 1999. [in Russian] (Зуев Е.В., Ляпунова О.А., Брыкова А.Н., Сурганова Л.Д., Никифоров М.Н., Разумова И.И., Плотникова Л.Н., Потокина С.А., Бородина Р.А., Иванова О.А., Кожушко Н.Н., Жукова А.З., Чмелева З.В., Климентьева Н.Ф. Каталог мировой коллекции ВИР. Выпуск 708. Характер изменчивости скороспелых образцов яровой мягкой пшеницы в различных эколого-географических условиях. Санкт-Петербург: ВИР; 1999).

Zuev E.V., Nikiforov M.N., Pankratov N.N., Platonov V.N., Loseva V.A., Brykova A.N. Catalogue of the VIR global collection. Issue 840. Spring soft wheat. Sources of breeding-valuable traits in the conditions of Tambov province. St. Petersburg: VIR; 2017. [in Russian] (Зуев Е.В., Никифоров М.Н., Панкратов Н.Н., Платонов В.Н., Лосева В.А., Брыкова А.Н. Каталог мировой коллекции ВИР. Выпуск 840. Яровая мягкая пшеница. Источники селекционно ценных признаков в условиях Тамбовской области. Санкт-Петербург: ВИР; 2017).

Zuev E.V., Brykova A.N., Nikiforov M.N. Original materials for soft spring wheat selection under the conditions of the Central-Chernozem zone of Russia. *IZVESTIA Oren-*

burg State Agrarian University. 2013;1(39):217-219. [in Russian] (Зуев Е.В., Брыкова А.Н., Никифоров М.Н. Исходный материал для селекции яровой мягкой пшеницы в условиях Центрально-Черноземной зоны России. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2013;1(39):217-219).

Информация об авторах

Валентина Алексеевна Лосева, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Екатерининская опытная станция – филиал ВИР, 393023 Россия, Тамбовская область, Никифоровский район, с. Екатеринино, ул. Парковая, ekosvir@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-4716-3766

Алла Николаевна Брыкова, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, a.brykova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-2215-5068

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

Information about the authors

Valentina A. Loseva, Associate Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Yekaterinino Experiment Station – branch of VIR, Parkovaya St., Yekaterinino Village, Nikiforovsky Distict, Tambov Province 393023, Russia, ekosvir@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-4716-3766

Alla N. Brykova, Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, a.brykova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-2215-5068

Evgeny V. Zuev, Cand. 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, e.zuev@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0001-9259-4384

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

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

Статья поступила в редакцию 27.02.2026; одобрена после рецензирования 25.03.2026; принята к публикации 22.04.2026.
The article was submitted on 27.02.2026; approved after reviewing on 25.03.2026; accepted for publication on 22.04.2026.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Краткое сообщение
УДК 575:633.34:581.1
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o4

CC BY

Анализ *in silico* геномных районов сои, ассоциированных с содержанием белка в семенах

И. В. Розанова[1], П. В. Климова[1], А. Я. Евлаш[1, 2], И. В. Сеферова[2]

[1] Научно-технологический университет «Сириус», Центр генетики и наук о жизни, Краснодарский край, Россия

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

Автор, ответственный за переписку: Ирина Вениаминовна Розанова, rozanova.iv@talantiuspeh.ru

Соя (*Glycine max* (L.) Merr.) – один из наиболее важных объектов мирового сельского хозяйства. Благодаря высокому содержанию белка, соя активно возделывается во многих странах. На основании литературного анализа и анализа доступных онлайн-ресурсов, содержащих полногеномные данные разных сортов, были исследованы последовательности генов, которые кодируют белки аспарагинсинтетазу (AS) и аспарагиназу (ASPG), ассоциированные с содержанием белка в семенах сои. Проведено выравнивание исследуемых последовательностей в сортах 'Jack', 'Enrei', 'Williams 82' и др., выявлены SNP и InDel. Сконструированы праймеры для стандартной ПЦР и для ДНК-штрихкодирования. Также подобрана выборка из 23 образцов сои из коллекции ВИР, которая показала контрастное содержание белка и может быть использована в дальнейшем изучении и верификации.

Ключевые слова: соя, *Glycine max*, пангеном, аспарагиназа, аспарагинсинтетаза

Благодарности: работа выполнена в рамках государственной программы федеральной территории «Сириус» «Научно-технологическое развитие федеральной территории "Сириус"» (Соглашение №18-03 от 10.09.2024). Формирование выборки сои осуществлено в рамках тематического плана ВИР по проекту № FGEM-2022-0002.

Для цитирования: Розанова И.В., Климова П.В., Евлаш А.Я., Сеферова И.В. Анализ *in silico* геномных районов сои, ассоциированных с содержанием белка в семенах. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(2):226-234. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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.

© Розанова И.В., Климова П.В., Евлаш А.Я., Сеферова И.В., 2026

BRIEF REPORTS

Brief report
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o4

In silico analysis of soybean genomic regions associated with seed protein content

Irina V. Rozanova[1], Polina V. Klimova[1], Anastasia Ya. Evlash[1, 2], Irina V. Seferova[2]

[1] *Sirius University of Science and Technology, Research Center of Genetics and Life Sciences, Krasnodar Territory, Russia*

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

Corresponding author: Irina V. Rozanova, rozanova.iv@talantiuspeh.ru

Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) is one of the most important crops in global agriculture. Due to its high protein content, soybean is actively cultivated in many countries. Upon reviewing published sources and analyzing available online resources containing whole-genome data for different cultivars, the sequences of genes encoding asparagine synthetase (AS) and asparaginase (ASPG) proteins associated with protein content in soybean seeds were analyzed. Multiple sequence alignments were performed for the target sequences in cvs. 'Jack', 'Enrei', 'Williams 82', and others, revealing SNPs and InDels. Primers were designed for standard PCR and DNA barcoding. Additionally, a panel of 23 soybean accessions from the VIR collection was selected, exhibiting contrasting protein content, which can be used for further studies and validation.

Keywords: soybean, *Glycine max*, pangenome, asparaginase, asparagine synthetase

Acknowledgments: this study was conducted with financial support from the state program for the Sirius Federal Territory "Scientific and technological development of the Sirius Federal Territory" (Agreement No. 18-03 dated Sept. 10, 2024). Soybean accessions were sampled within the framework of the thematic plan of VIR, Project No. FGEM-2022-0002.

For citation: Rozanova I.V., Klimova P.V., Evlash A.Ya., Seferova I.V. *In silico* analysis of soybean genomic regions associated with seed protein content. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(2):226-234. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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

Соя (*Glycine max* (L.) Merr.) – один из наиболее значимых объектов мирового сельского хозяйства, универсальная культура с высокой питательной ценностью и широким спектром применения. Благодаря высокому содержанию белка (30–52%), соя активно возделывается во многих странах как продукт питания, а также используется для кормления животных и в технических целях (Gaffield et al., 2024). По содержанию белка она превосходит все другие возделываемые культуры, включая горох (22–24%) (Emkani et al., 2023), подсолнечник (25%) (Petraru et al., 2021), пшеницу (9–26%) (Cao et al., 2021), рис (7%) (Fukai, Mitchell, 2024) и др. Она содержит все девять незаменимых аминокислот, что делает ее ключевым источником растительного белка и важным элементом продовольственной безопасности, особенно в регионах с недостатком животного белка (Guo et al., 2022). Пищевая ценность соевого белка определяется высоким содержанием незаменимых аминокислот, доля которых составляет около 20% от общего содержания белка, тогда как для пшеницы этот показатель не превышает 18% (Gorissen et al., 2018). По содержанию полиаминов, важных для клеточного деления и защиты от окислительного стресса, соевые бобы занимают второе место среди культур – после кукурузы (Egorov et al., 2021).

Исследования генетических механизмов, контролирующих содержание белка в сое, активно развиваются. Однако на сегодняшний момент нет четкого понимания того, как в семенах сои регулируется содержание белка. QTL, ассоциированные с признаком «содержание белка», распределены по всем хромосомам, однако их интервалы остаются слишком широкими для точного выделения генов-кандидатов. Например, для локуса на хромосоме 20, ассоциированного с высоким содержанием белка, область была последовательно уточнена с 8,4 до 1 Мб (Hwang et al., 2014; Vaughn et al., 2014; Bandillo et al., 2015; Zhang Q. et al., 2023), но все еще остается слишком обширной для выделения конкретных регуляторных генов. Известно, что содержание белка в семенах сои проявляет сильную зависимость от условий получения репродукции семян (Novikova et al., 2018). Некоторые сорта демонстрируют высокий уровень белка при выращивании в определенных географических регионах: так, генотипы PI407788A и ‘Enrei’ содержат аллель (CC+) гена *GmSWEET39* на хромосоме 15, ассоциированный с повышенным содержанием белка, в Южной Корее и Японии соответственно (Brzostowski, Diers, 2017; Zhang H. et al., 2020).

Сложность изучения механизма наследования у сои объясняется полиплоидизацией генома сои и перестройкой гомологичных хромосом, что ведет к дублированию локусов и усложняет картирование. Современные методы исследования, объединяющие данные QTL-картирования с анализами РНК-секвенирования, позволяют выявлять структурные вариации (SNP, InDel) между генотипами с контрастным содержанием белка, что способствует идентифицированию ряда генов-кандидатов.

Существуют работы, описывающие молекулярные регуляторы синтеза белков. Так, последовательность, кодирующая транспортер сахарозы *GmSWEET39*, содержит аллель (CC+) на хромосоме 15, наличие которой способствует снабжению развивающихся семян промежуточными продуктами метаболизма, влияя как на уровень белка, так и масла. Данная делеция приводит к укорочению белкового транспортера и изменению соотношения этих компонентов (Zhang H. et al., 2020). Высокая экспрессия аспарагинсинтетазы и аспарагиназы положительно коррелирует с повышенным содержанием белка в семенах (Wan et al., 2006; Pandurangan et al., 2012). Регуляторные белки, такие как NF-YC4 и ген арабидопсиса *Qua-Quine Starch* (*QQS*), также задействованы в контроле соотношения белка и масла: эктопическая экспрессия *QQS* повышает содержание белка на ~20% при одновременном снижении масла на ~10%, тогда как сверхэкспрессия его партнера *GmNF-YC4-2* (*Glyma.04g196200*) повышает как белковость семян, так и урожайность.

Главным регулятором синтеза запасных белков выступает *GmLEC2*. Эктопическая экспрессия *LEC2a* в *Arabidopsis thaliana* приводит к увеличению доли белка, тогда как мутации с утратой функции *Atlec2* снижают этот показатель примерно на 40%. Похожие эффекты наблюдаются при экспрессии генов других аминокислотных путей. Например, устойчивый к отрицательной обратной связи вариант антранилатсинтазы риса (OASA1D) повышает уровень триптофана в семенах без подавления роста растений (Ishimoto et al., 2009; Kita et al., 2010). Аналогичная стратегия применена для метионина: экспрессия нечувствительной к регуляции формы цистатионин-γ-синтазы (CGS) из *Arabidopsis* увеличивает его уровень в семенах без снижения урожайности (Yu et al., 2018). Применение нечувствительных ферментов дигидродипиколинатсинтазы (DHDPS) из *Escherichia coli* и аспартокиназы (AK) из *Corynebacterium* позволило увеличить содержание лизина более чем в пять раз.

Полногеномная последовательность сои впервые была получена в 2010 г. при секвенировании сорта ‘Williams 82’ с использованием технологии коротких прочтений (Schmutz et al., 2010). В том же году секвенировали геном дикорастущей сои (*G. soja* Siebold et Zucc.) и провели его детальное сравнение с культурной (*G. max*). Было показано, что генетическое разнообразие *G. soja* выше, чем у культурной сои, что подчеркнуло ценность диких форм как источника новых аллелей для селекции на устойчивость и продуктивность. Современные исследования геномной изменчивости выходят за рамки анализа одиночных геномов, переходя к формированию пангеномов – объединенных баз данных генетических вариаций внутри вида.

В рамках данного исследования проведен анализ *in silico* в пангеноме аллельных вариантов генов, кодирующих аспарагинсинтетазу (AS) и аспарагиназу (ASPG).

Материалы и методы

Анализ in silico потенциальных генов-мишеней

Поиск последовательностей генов белков аспарагинсинтетазы и аспарагиназы проводили с использованием алгоритма BLASTN в базе данных NCBI в референсном геноме. Были скачаны геномные последовательности сортов сои ‘Jack’, ‘Cozusu’, ‘Tanba’, ‘Enrei’, ‘Pekin’ и ‘Fukujutaka’. С помощью веб-платформы Galaxy (Galaxy Community, 2024) по референсным кодирующим последовательностям из каждого генома выделяли соответствующие участки. Для множественного выравнивания нуклеотидных последовательностей применяли алгоритм MUSCLE, доступный в онлайн-ресурсе Multalin (версия 5.4.1) (Corpet, 1988). На основании результатов множественного выравнивания был проведен дизайн праймеров с помощью программного обеспечения Unipro UGENE v39.0 в модуле Primer Designer (Okonechnikov et al., 2012).

Растительный материал

Для исследования геномных локусов создали выборку из 23 образцов сои (*G. max*), контрастных по содержанию белка, из коллекции ВИР. Структуру выборки составили образцы, имеющие происхождение из 12 стран (Венгрия, Германия, Казахстан, Канада, Китай, Польша, Россия, США, Украина, Франция, Чехия, Япония). Содержание белка оценено на образцах, полученных из коллекции ВИР.

Измерение белка

Измерение содержания белка сои проводилось при помощи ИК-спектрофотометрии. Процесс ИК-анализа сводится к заполнению кюветы исследуемым материалом, установке ее в измерительную камеру прибора и получению результата в требуемых единицах измерения.

Результаты

В данной работе валидированы последовательности генов *asparagine synthetase* (*AS*) и *asparaginase* (*ASPG*), изменчивость по которым, в соответствии с литературными данными, влияет на различия по содержанию белка (Wan et al., 2006; Pandurangan et al., 2012). Для дальнейшего изучения аллельных отличий этих генов у образцов сои из изучаемой выборки, контрастных по содержанию белка, в отчетный период проведен анализ *in silico*.

Аспарагиназа (ASPG)

Выравнивание нуклеотидных последовательностей гена, кодирующих ASPG, из шести сортов сои (*Glycine max*), геномы которых получены из NCBI (https://www.ncbi.nlm.nih.gov), представлено на рисунке 1. В консенсусной последовательности отражается самый частый вариант нуклеотида.

Множественное выравнивание нуклеотидных последовательностей гена, кодирующего ASPG, из разных сортов выявило следующие особенности. Сорт ‘Fukujutaka’ содержит инсерцию в одной позиции (показана пробелами в других последовательностях), что приводит к его частичному выпадению из общего консенсуса. У сорта ‘Pekin’ наблюдается InDel в виде пары нуклеотидов (AA/TT). Остальные сорта (‘Jack’, ‘Tanba’, ‘Cozusu’, ‘Enrei’) демонстрируют полное совпадение с консенсусной последовательностью без значимых вставок/делеций. Такая высокая степень гомологии подтверждает консервативность исследуемого генного локуса среди изученных генотипов. Праймеры на данную последовательность не разрабатывались.

Аспарагинсинтетаза (AS)

Выравнивание нуклеотидных последовательностей гена, кодирующего аспарагинсинтетазу (AS), было выполнено для трех сортов сои (*G. max*), геномы которых получены из NCBI. Выравнивание представлено на рисунке 2. AS был выровнен в трех геномах: ‘Enrei’, ‘Jack’ и ‘Williams 82’.

Было обнаружено два участка. Первый (размером в 200 пн), предположительно, может быть ассоциирован с содержанием белка в семенах сои. Второй участок показал выявленные инсерции/делеции – вставкой/делецией отличается сорт ‘Enrei’ (пробелы относительно референсного сорта ‘Williams 82’).

Проведенное множественное выравнивание идентифицированных нуклеотидных последовательностей позволило выявить наиболее консервативные участки, к которым был выполнен дизайн праймеров (табл. 1).

Для дальнейшего исследования была собрана выборка из 23 образцов ДНК, которая по результатам опубликованных каталогов коллекции ВИР включала в себя сорта с контрастным содержанием белка (табл. 2). Содер-

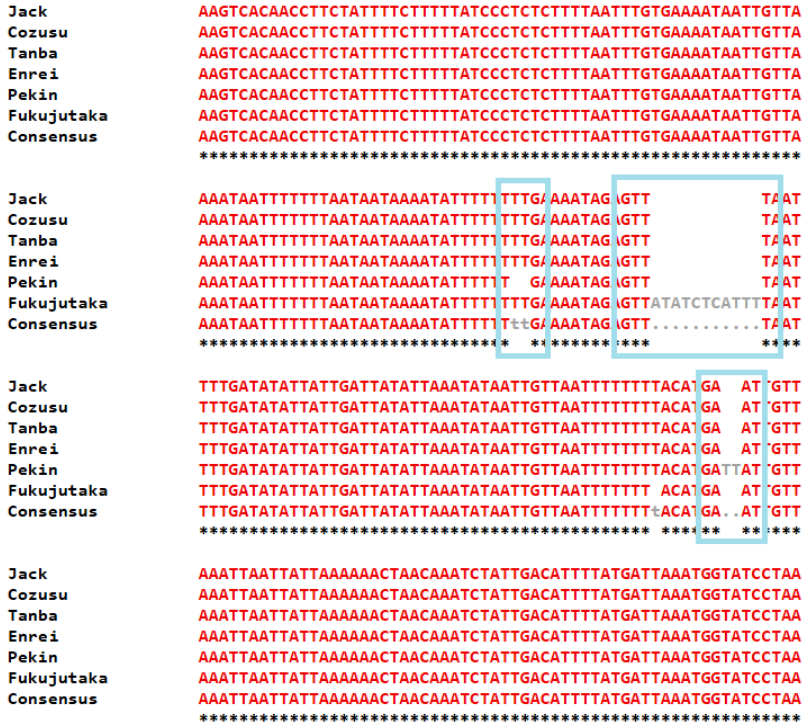


Рис. 1. Выравнивание последовательностей гена, кодирующего аспарагиназу (ASPG), из шести сортов сои (*Glycine max* (L.) Merr.): ‘Jack’, ‘Cozusu’, ‘Tanba’, ‘Enrei’, ‘Pekin’, ‘Fukujutaka’

Fig. 1. Sequence alignment of the gene encoding asparaginase (ASPG) from six soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) cultivars: ‘Jack’, ‘Cozusu’, ‘Tanba’, ‘Enrei’, ‘Pekin’, and ‘Fukujutaka’

Рис. 2. **Выравнивание последовательностей гена, кодирующего аспарагинсинтетазу (AS), из трех сортов сои (*Glycine max* (L.) Merr.): ‘William 82’, ‘Jack’, ‘Enrei’**

Fig. 2. **Sequence alignment of the gene encoding asparagine synthetase (AS) from three soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) cultivars: ‘William 82’, ‘Jack’, and ‘Enrei’**

Таблица 1. **Последовательности праймеров, используемые для стандартной амплификации и амплификации ДНК-штрихкодов у образцов *Glycine max* (L.) Merr.**

Table 1. **Primer sequences used for standard and DNA barcode amplification in *Glycine max* (L.) Merr. accessions**

Название праймера	Последовательность (5’ → 3’)	Примечание
AS_Gmax_PCR_F	GATGGGCAGTTAGCTCCTGA	Праймеры для ПЦР
AS_Gmax_PCR_R	CTCAACATATACTTGCAGAACAGAC	
AS_Gmax_1_F	GTGACCAGAAGGAAGATAGGGAGcaCCAAGTCACATCAGATACAGGAC	Праймеры для амплификации ДНК-штрихкодов
AS_Gmax_2_R	CATTGATAACACTGGCACAGACAcaTGAAGTATATGTTTAATATGCCATTTCCTC	
AS_Gmax_3_F	GTGACCAGAAGGAAGATAGGGAGtcaCCAAGTCACATCAGATACAGGAC	
AS_Gmax_4_R	CATTGATAACACTGGCACAGACAtcaTGAAGTATATGTTTAATATGCCATTTCCTC	

Таблица 2. **Содержание белка в сортах сои из коллекции ВИР, подобранных для дальнейшей работы**

Table 2. **Protein content in soybean cultivars from the VIR collection selected for further studies**

Номер по каталогу ВИР	Название	Происхождение	Содержание белка на ИК (%)	Содержание белка по классификатору*
4878	‘Урожайная’	Россия, Амурская обл.	49,64	Высокое
4909	Без названия	Канада	48,48	Высокое
5267	‘Wolfsthaler’	Германия	46,63	Высокое
5797	‘Balvanska’	Венгрия	43,00	Среднее
5884	‘Tokio vert’	Германия	51,79	Высокое
6020	‘Bulharska’	Чехословакия	47,70	Высокое
6197	‘Vilenska 18297’	Чехословакия	48,92	Высокое
6226	‘Grignon 48’	Франция	50,25	Высокое
6473	‘Амурская 402’	Россия, Амурская обл.	45,03	Высокое
6972	R-11/17-76	Польша	44,83	Среднее
9108	‘Weber’	США	41,14	Среднее
9233	‘Kador’	Франция	42,58	Среднее
9351	‘Kou Kei 95’	Япония	46,54	Среднее
10323	‘Heinong 4’	Китай	38,46	Среднее
10364	T 313	США	44,04	Среднее
10620	Л.263	Россия, Приморский край	44,52	Среднее
10696	‘Oni hadakasai’	Япония	41,93	Среднее
11129	‘МОК’	Россия, Хабаровский край	46,02	Высокое
11353	‘Murzynka’	Чехия	45,99	Высокое
11441	N 8	Китай	44,01	–
11607	‘Бриз’	Россия, Приморский край	46,77	Высокое
11615	‘Барс’	Россия, Краснодарский край	41,81	Среднее
11724	‘Грея’	Россия, Краснодарский край	47,07	Высокое

Примечание: * – использованы градации, предлагаемые классификатором (Shchelko et al., 1990)

Note: * – gradations proposed in the list of descriptors were used (Shchelko et al., 1990)

жание белка в семенах образцов сои, выявленное с помощью ИК-спектрофотометрии, и соотношение с классификатором показаны в таблице 2.

Обсуждение

Соя (*G. max*) является одним из наиболее хорошо изученных объектов среди культурных растений. Такое же пристальное внимание уделяется ее дикому сородичу, *G. soja*. Первый пангеном сои, включавший семь образцов *G. soja*, был создан в 2014 г., и на данной работе было показано, что быстрее всего эволюционируют геномные локусы, обогащенные *R*-генами устойчивости (Li et al., 2014). Затем пангеном был расширен до 30 образцов, что позволило выявить географическую структуру популяций и зависимость некоторых локусов, ассоциированных с масличностью семян, от региона происхождения (Zhou et al., 2015). Последующие проекты дополнили пангеном новыми эталонными сборками: китайская дикая соя W05 (Shen et al., 2018), восемь сортов из различных широт (Chu et al., 2021), а также создан обширный пангеном PanSoy, включающий 204 филогенетически и географически разнообразных образцов (Torkamaneh et al., 2021). В 2024 г. были опубликованы результаты секвенирования геномов сорта 'Jack' и отличающегося высоким содержанием белка сорта 'HJ117' (Huang et al., 2024).

Исследования, выполненные с помощью GWAS и QTL-анализа, используют один референсный геном. При этом видовое разнообразие внутри культуры не учитывается. Также не учитываются делеции, инсерции и инверсии. Исследование пангеномных данных дает более полное представление о генетическом разнообразии вида и включает структурные варианты, которые отсутствуют в единичном референсном геноме.

Известно, что существует связь между уровнями аспарагинсинтетазы и аспарагиназы и уровнем белка в семенах сои (Pandurangan et al., 2012; Hooker et al., 2023). Но данных об исследовании в пангеноме последовательностей, кодирующих AS и ASPG, нет. Анализ вариабельных участков в составе пангенома открывает новые возможности для изучения полиморфных локусов, ассоциированных с желаемым признаком. В нашем исследовании проведен анализ *in silico* нуклеотидных последовательностей генов, которые кодируют аспарагинсинтетазу и аспарагиназу, на шести геномах сои ('Jack', 'Enrei', 'Williams 82' и др.). Выявлено пять SNP/InDel (см. рис. 1, 2), включая AATT-InDel в ASPG 'Fukujutaka' и делецию в 200 пн в AS 'Enrei' против 'Williams 82'.

Сформирована панель из 23 образцов из коллекции сои ВИР с контрастным содержанием белка (38–52%) (см. табл. 2), спроектированы праймеры, валидация которых позволит создать диагностическую панель для скрининга белка. Полученные данные – первый шаг к диагностической панели для скрининга коллекции сои на содержание белка.

Заключение

Анализ *in silico* последовательностей генов, кодирующих белки аспарагинсинтетазу и аспарагиназу, выявил полиморфные локусы, ассоциированные с содержанием белка в сортах сои. Спроектированные праймеры создают основу диагностической модели для скрининга контрастных образцов.

References / Литература

Bandillo N., Jarquin D., Song Q., Nelson R., Cregan P., Specht J. et al. A population structure and genome-wide association analysis on the USDA soybean germplasm collection. *The Plant Genome*. 2015;8(3):plantgenome2015.04.0024. DOI: 10.3835/plantgenome2015.04.0024

Brzostowski L.F., Diers B.W. Agronomic evaluation of a high protein allele from PI407788A on chromosome 15 across two soybean backgrounds. *Crop Science*. 2017;57(6):2972-2978. DOI: 10.2135/cropsci2017.02.0083

Cao H., Duncan O., Islam S., Zhang J., Ma W., Millar A.H. Increased wheat protein content via introgression of an HMW glutenin selectively reshapes the grain proteome. *Molecular and Cellular Proteomics*. 2021;20:100097. DOI: 10.1016/j.mcpro.2021.100097

Chu J.C.C., Peng B., Tang K., Yi X., Zhou H., Wang H. et al. Eight soybean reference genome resources from varying latitudes and agronomic traits. *Scientific Data*. 2021;8(1):164. DOI: 10.1038/s41597-021-00947-2

Corpet F. Multiple sequence alignment with hierarchical clustering. *Nucleic Acids Research*. 1988;16(22):10881-10890. DOI: 10.1093/nar/16.22.10881

Egorov O.S., Borisova N.Yu., Borisova E.Ya., Rezhabbaev M.L., Afanas'eva E.Yu., Arzamastsev E.V. Structure and biological action of analogs and derivatives of biogenic polyamines. *Fine Chemical Technologies*. 2021;16(4):287-306. [in Russian] (Егоров О.С., Борисова Н.Ю., Борисова Е.Я., Режаббаев М.Л., Афанасьева Е.Ю., Арзамасцев Е.В. Структура и биологическое действие аналогов и производных биогенных полиаминов. *Тонкие химические технологии*. 2021;16(4):287-306). DOI: 10.32362/2410-6593-2021-16-4-287-306

Emkani M., Moundanga S., Oliete B., Saurel R. Protein composition and nutritional aspects of pea protein fractions obtained by a modified isoelectric precipitation method using fermentation. *Frontiers in Nutrition*. 2023;10:1284413. DOI: 10.3389/fnut.2023.1284413

Fukai S., Mitchell J. Grain yield and protein concentration relationships in rice. *Crop and Environment*. 2024;3(1):12-24. DOI: 10.1016/j.crope.2023.11.002

Gaffield K.N., Goodband R.D., DeRouchey J.M., Tokach M.D., Woodworth J.C., Denny G. et al. A review of soybean processing byproducts and their use in swine and poultry diets. *Translational Animal Science*. 2024;8:txae063. DOI: 10.1093/tas/txae063

Galaxy Community. The Galaxy platform for accessible, reproducible, and collaborative data analyses: 2024 update. *Nucleic Acids Research*. 2024;52(W1):W83–W92. DOI: 10.1093/nar/gkae410

Gorissen S.H.M., Crombag J.J.R., Senden J.M.G., Waterval W.A.H., Bierau J., Verdijk L.B. et al. Protein content and amino acid composition of commercially available plant-based protein isolates. *Amino Acids*. 2018;50(12):1685-1695. DOI: 10.1007/s00726-018-2640-5

Guo B., Sun L., Jiang S., Ren H., Sun R., Wei Z. et al. Soybean genetic resources contributing to sustainable protein production. *Theoretical and Applied Genetics*. 2022;135(11):4095-4121. DOI: 10.1007/s00122-022-04222-9

Hooker J.C., Smith M., Zapata G., Charette M., Luckert D., Mohr R.M. et al. Differential gene expression provides leads to environmentally regulated soybean seed protein content. *Frontiers in Plant Science*. 2023;14:1260393. DOI: 10.3389/fpls.2023.1260393

Huang Y., Koo D.H., Mao Y., Herman E.M., Zhang J., Schmidt M.A. A complete reference genome for the soybean cv. Jack.

Plant Communications. 2024;5(2):100765. DOI: 10.1016/j.xplc.2023.100765

Hwang E.Y., Song Q., Jia G., Specht J.E., Hyten D.L., Costa J. et al. A genome-wide association study of seed protein and oil content in soybean. *BMC Genomics*. 2014;15:1. DOI: 10.1186/1471-2164-15-1

Ishimoto M., Rahman S.M., Hanafy M.S., Khalafalla M.M., El-Shemy H.A., Nakamoto Y. et al. Evaluation of amino acid content and nutritional quality of transgenic soybean seeds with high-level tryptophan accumulation. *Molecular Breeding*. 2009;25(2):313-326. DOI: 10.1007/s11032-009-9334-3

Kita Y., Nakamoto Y., Takahashi M., Kitamura K., Wakasa K., Ishimoto M. Manipulation of amino acid composition in soybean seeds by the combination of deregulated tryptophan biosynthesis and storage protein deficiency. *Plant Cell Reports*. 2010;29(1):87-95. DOI: 10.1007/s00299-009-0800-5

Li Y.H., Zhou G., Ma J., Jiang W., Jin L.G., Zhang Z. Et al. *De novo* assembly of soybean wild relatives for pan-genome analysis of diversity and agronomic traits. *Nature Biotechnology*. 2014;32(10):1045-1052. DOI: 10.1038/nbt.2979

NCBI. National Center for Biotechnology Information: [website]. Available from: https://www.ncbi.nlm.nih.gov [accessed Dec. 11, 2025].

Novikova L.Yu., Seferova I.V., Nekrasov A.Yu., Perchuk I.N., Shelenga T.V., Samsonova M.G. et al. Impact of weather and climate on seed protein and oil content of soybean in the North Caucasus. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2018;22(6):708-715. [in Russian] (Новикова Л.Ю., Сеферова И.В., Некрасов А.Ю., Перчук И.Н., Шеленга Т.В., Самсонова М.Г. и др. Влияние погодно-климатических условий на содержание белка и масла в семенах сои на Северном Кавказе. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2018;22(6):708-715). DOI: 10.18699/VJ18.414

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

Pandurangan S., Pajak A., Molnar S.J., Cober E.R., Dhaubhadel S., Hernández-Sebastià C. Kaiser W.M. et al. Relationship between asparagine metabolism and protein concentration in soybean seed. *Journal of Experimental Botany*. 2012;63(8):3173-3184. DOI: 10.1093/jxb/ers039

Petraru A., Ursachi F., Amariei S. Nutritional characteristics assessment of sunflower seeds, oil and cake. Perspective of using sunflower oilcakes as a functional ingredient. *Plants (Basel)*. 2021;10(11):2487. DOI: 10.3390/plants10112487

Schmutz J., Cannon S.B., Schlueter J., Ma J., Mitros T., Nelson W. et al. Genome sequence of the palaeopolyploid soybean. *Nature*. 2010;463(7278):178-183. DOI: 10.1038/nature08670

Shchelko L., Sedova T., Korneychuk V., Pastucha L., Sinsky T., Hofirek P., Bares I., Sehnalova J. The international COMECON list of descriptors for the genus *Glycine* Willd. Leningrad: VIR; 1990. [in Russian] (Щелко Л., Седова Т., Корнейчук В., Пастуха Л., Синский Т., Гофирек П., Бареш И., Сегналова Я. Международный классификатор СЭВ рода *Glycine* Willd. Ленинград: ВИР; 1990).

Shen Y., Liu J., Geng H., Zhang J., Liu Y., Zhang H. et al. *De novo* assembly of a Chinese soybean genome. *Science China. Life Sciences*. 2018;61(8):871-884. DOI: 10.1007/s11427-018-9360-0

Torkamaneh D., Lemay M., Belzile F. The pan-genome of the cultivated soybean (PanSoy) reveals an extraordinarily conserved gene content. *Plant Biotechnology Journal*. 2021;19(9):1852-1862. DOI: 10.1111/pbi.13600

Vaughn J.N., Nelson R.L., Song Q., Cregan P.B., Li Z. The genetic architecture of seed composition in soybean is refined by genome-wide association scans across multiple populations. *G3 (Bethesda)*. 2014;4(11):2283-2294. DOI: 10.1534/g3.114.013433

Wan T.F., Shao G.H., Shan X.C., Zeng N.Y., Lam H.M. Correlation between *AS1* gene expression and seed protein contents in different soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) cultivars. *Plant Biology (Stuttgart)*. 2006;8(2):271-276. DOI: 10.1055/s-2006-923876

Yu Y., Hou W.S., Hacham Y., Sun S., Wu C.X., Matityahu I. et al. Constitutive expression of feedback-insensitive cystathionine γ-synthase increases methionine levels in soybean leaves and seeds. *Journal of Integrative Agriculture*. 2018;17(1):54-62. DOI: 10.1016/S2095-3119(16)61599-X

Zhang H., Goettel W., Song Q., Jiang H., Hu Z., Wang M.L. et al. Selection of GmSWEET39 for oil and protein improvement in soybean. *PLoS Genetics*. 2020;16(11):e1009114. DOI: 10.1371/journal.pgen.1009114

Zhang Q., Sun T., Wang J., Fei J., Liu Y., Liu L. et al. Genome-wide association study and high-quality gene mining related to soybean protein and fat. *BMC genomics*. 2023;24(1):596. DOI: 10.1186/s12864-023-09687-6

Zhou Z., Jiang Y., Wang Z., Gou Z., Lyu J., Li W. Et al. Resequencing 302 wild and cultivated accessions identifies genes related to domestication and improvement in soybean. *Nature Biotechnology*. 2015;33(4):408-414. DOI: 10.1038/nbt.3096

Информация об авторах

Ирина Вениаминовна Розанова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Научно-технологический университет «Сириус», Научный центр генетики и наук о жизни, 354340 Россия, Краснодарский край, федеральная территория «Сириус», пгт. Сириус, Олимпийский пр., 1, rozanova.iv@talantiuspeh.ru, https://orcid.org/0000-0003-4341-0766

Полина Владимировна Климова, магистрант, Научно-технологический университет «Сириус», Научный центр генетики и наук о жизни, 354340 Россия, Краснодарский край, федеральная территория «Сириус», пгт. Сириус, Олимпийский пр., 1, Klimova.polya04@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-7808-3782

Анастасия Ярославовна Евлаш, младший научный сотрудник, Научно-технологический университет «Сириус», Научный центр генетики и наук о жизни, 354340 Россия, Краснодарский край, федеральная территория «Сириус», пгт. Сириус, Олимпийский пр., 1, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, evlash.ae@talantiuspeh.ru, https://orcid.org/0000-0003-0246-8929

Ирина Владимировна Сеферова, 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, i.seferova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0003-3308-9198

Information about the authors

Irina V. Rozanova, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Sirius University of Science and Technology, Research Center of Genetics and Life Sciences, 1 Olimpiysky Ave., Sirius Settlem., Sirius Federal Territory, Krasnodar Territory 354340, Russia, rozanova.iv@talantiuspeh.ru, https://orcid.org/0000-0003-4341-0766

Polina V. Klimova, MSc Student, Sirius University of Science and Technology, Research Center of Genetics and Life Sciences, 1 Olimpiysky Ave., Sirius Settlem., Sirius Federal Territory, Krasnodar Territory 354340, Russia, Klimova.polya04@gmail.com, https://orcid.org/0009-0003-7808-3782

Anastasia Ya. Evlash, Associate Researcher, Sirius University of Science and Technology, Research Center of Genetics and Life Sciences, 1 Olimpiysky Ave., Sirius Settlem., Sirius Federal Territory, Krasnodar Territory 354340, Russia, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, evlash.ae@talantiuspeh.ru, https://orcid.org/0000-0003-0246-8929

Irina V. Seferova, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, i.seferova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0003-3308-9198

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

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

Статья поступила в редакцию 04.01.2026; одобрена после рецензирования 24.01.2026; принята к публикации 25.01.2026.
The article was submitted on 04.01.2026; approved after reviewing on 24.01.2026; accepted for publication on 25.01.2026.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Краткое сообщение
УДК [634.11+634.141]:664.85
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o8

CC BY

Селекционная ценность сортообразцов малораспространенных семечковых культур в генофонде Крымской опытно-селекционной станции ВИР

И. С. Чепинога, А. В. Тихонова

Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н. И. Вавилова, Крымская опытно-селекционная станция – филиал ВИР, Крымск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Ирина Семеновна Чепинога, iris_57@list.ru

Актуальность. Малораспространенные семечковые культуры являются ценным исходным материалом для селекционных программ, в том числе по улучшению питательных свойств плодов яблони. Плоды нетрадиционных семечковых культур, таких как мелкоплодные виды яблонь и хеномелес, отличаются высокой биологической ценностью минерального и витаминного состава.
Материал и методы. Образцы мелкоплодных яблонь и хеномелеса, а также гибрид айвы с яблоней из коллекции ВИР, сохраняемой на Крымской опытно-селекционной станции ВИР, оценивали в 2020–2023 гг. по срокам созревания, урожайности, потребительским качествам свежих плодов и продуктов консервирования по общепринятым методикам.
Результаты. Дана оценка изученных образцов по срокам созревания, массе, окраске, вкусу плодов, плотности и сахаристости мякоти, их консервным качествам. С целью создания новых сортов плодовых культур образцы ранеток и китаек: 'Лойко', 'Кызыл Алма', 'Мелкоплодная М 3', 'Китайка Красная', а также хеномелеса: 'Wakaba' и 'Texas Scarlet', учитывая их высокие характеристики плодов, выделены как источники привлекательного вида плодов, повышенного содержания сахаров и плотности мякоти, с высокой дегустационной оценкой продуктов консервирования.
Заключение. Для создания новых сортов яблони, более ценных по питательным свойствам, из 18 изученных образцов мелкоплодных яблонь с комплексом положительных характеристик плодов выделены генотипы: 'Лойко', 'Кызыл Алма', 'Мелкоплодная М 3', Элита 16-58-5, Элита 16-58-92, Элита 3-39-54. Для улучшения технологических свойств сортов семечковых культур в процессе селекции наиболее перспективны комплексные источники высокого качества плодов (плотность и сахаристость мякоти, высокие оценки (4,5–4,7 балла) консервированной продукции): яблоня – 'Кызыл Алма', 'Китайка Красная', 'Мелкоплодная М 3'; хеномелес – 'Wakaba' и 'Texas Scarlet'.

Ключевые слова: *Malus*, *Chaenomeles*, плод, морфологический признак, пектин, технологическая переработка

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту № FGEM-2025-0004 «Совершенствование подходов и методов *ex situ* сохранения идентифицированного генофонда плодовых, ягодных культур, винограда и их диких родичей, разработка технологий их эффективного использования в селекции».

Для цитирования: Чепинога И.С., Тихонова А.В. Селекционная ценность сортообразцов малораспространенных семечковых культур в генофонде Крымской опытно-селекционной станции ВИР. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(2):235-242. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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.

© Чепинога И.С., Тихонова А.В., 2026

BRIEF REPORTS

Brief report
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o8

Breeding value of nontraditional pome fruit cultivars and accessions maintained at Krymsk Experiment Breeding Station of VIR

Irina S. Chepinoga, Anna V. Tikhonova

N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Krymsk Experiment Breeding Station – branch of VIR, Krymsk, Russia

Corresponding author: Irina S. Chepinoga, iris_57@list.ru

Background. Collections of rare pome fruit crops are valuable source material for breeding programs targeted at the improvement of nutritional properties of apple. The fruits of nontraditional pome crops, such as crabapples and flowering quince, demonstrate high biological value of their mineral and vitamin composition.
Materials and methods. The accessions of crabapples and flowering quince, as well as an apple-quince hybrid, from the VIR collection, maintained at Krymsk Experiment Breeding Station of VIR, were evaluated in 2020–2023 for their fruiting schedule, yield, and consumer qualities of fresh fruits and canned products. Conventional evaluation techniques were used.
Results. Such characters as ripening time, fruit weight, color, taste, pulp density and sugar content, and canning qualities were analyzed in the studied accessions. Among Siberian and Chinese crabapples, cvs. 'Loiko', 'Kyzyl Alma', 'Melkoplodnaya M 3', and 'Kitayka Krasnaya' were selected as promising for fruit crop breeding. Flowering quince cvs. 'Wakaba', and 'Texas Scarlet' were identified for their high fruit quality, sugar content, and pulp density. Their canned products manifested high taste and flavor levels.
Conclusion. Among the studied 18 crabapple accessions with good fruit characteristics, 'Loiko', 'Kyzyl Alma', 'Melkolodnaya M 3', Elita 16-58-5, Elita 16-58-92, and Elita 3-39-54 showed the best prospects as sources for the development of new apple-tree cultivars with higher nutritive value. Complex sources of high fruit quality (pulp density and sugar content, canned product scores of 4.5 to 4.7) were most promising for technological improvement of pome fruit cultivars: crabapple 'Kyzyl Alma', 'Kitayka Krasnaya', and 'Melkoplodnaya M 3'; flowering quince 'Wakaba', and 'Texas Scarlet'.

Keywords: *Malus*, *Chaenomeles*, fruit, morphological feature, pectin, technological processing

Acknowledgments: the research was performed within the framework of the state tasks according to 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: Chepinoga I.S., Tikhonova A.V. Breeding value of nontraditional pome fruit cultivars and accessions maintained at Krymsk Experiment Breeding Station of VIR. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(2):235-242. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-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

Известно, что в организме человека под воздействием различных неблагоприятных факторов внешней среды происходит избыточное накопление свободных радикалов кислорода, что приводит к ухудшению его иммунных функций (Karbyshev, Abdullaev, 2018). В связи с этим в настоящее время важное значение приобретают продукты питания функциональной направленности, содержащие в больших количествах аскорбиновую кислоту, каротиноиды, фенолкарбоновые кислоты, *P*-активные вещества, пектины и нерастворимую клетчатку. Особенно ценны по содержанию в плодах нутриентов малораспространенные семечковые плодовые культуры, такие как яблони ранетки, китайки и некоторые виды хеномелеса: японский (*Chaenomeles japonica* (Thunb.) Lindl. ex Spach), прекрасный (*C. speciosa* (Sweet) Nakai), превосходный (*C. × superba* (Frahm) Rehder) и калифорнийский (*C. × californica* W.B. Clarke ex C. Weber), которые все чаще культивируются как садоводами-любителями, так и в небольших хозяйствах РФ. Все названные виды скороплодны, урожайны, достаточно пластичны (зимостойки, засухоустойчивы) и нетребовательны к почвам (Kornilov, Ozherelieva, 2017; Chepinoga, Kovalenko, 2017).

В плодах хеномелеса, ранеток и китаек накапливается богатый минеральный состав (калий, кальций, фосфор, магний, цинк, железо, марганец, селен и другие), а также большое количество органических кислот (яблочная, винная, лимонная), фенольных соединений, дубильных веществ, эфирного масла, фитонцидов (Makarenko, 2021). Аскорбиновой кислоты в плодах мелкоплодных яблонь содержится от 10,7 до 21,4 мг/100 г. Сумма *P*-активных веществ в плодах – от 135 до 650 мг/100 г. Выявлено также высокое содержание суммы пектиновых веществ: от 10,8 до 22,5% на сухую массу (Gudkovsky, 2001).

Хеномелес по накоплению витаминов С и Р в плодах превышает аналогичные показатели у сортов других семечковых культур в 2–5 раз. Содержание аскорбиновой кислоты в его плодах – до 200 мг/100 г. Полифенольный комплекс хеномелеса представлен лейкоантоцианами (до 70 мг/100 г), флавонолами (до 54 мг/100 г), общими полифенолами (до 765 мг/100 г) в зависимости от сорта. Плоды хеномелеса – ценный источник пектиновых веществ (более 1,3% на сухую массу), а также нерастворимой клетчатки. Содержание сахарозы в мякоти плодов хеномелеса небольшое, преобладают моносахара (Pricko et al., 2023).

Учитывая биохимические показатели, плоды малораспространенных семечковых культур являются ценным сырьем для получения консервной продукции. Из них изготавливают компоты, варенье, цукаты, конфитюр, составляют купажи с плодами других растений. Для расширения ассортимента функциональных продуктов питания за счет целенаправленного использования высоковитаминного сырья из хеномелеса в Северо-Кавказском федеральном научном центре садоводства, виноградарства, виноделия (СКФНЦСВВ, г. Краснодар) разработаны рецептурные композиции напитков, нектаров, соков (Droficheva et al., 2010; Prichko et al., 2014; Pricko et al., 2023). К тому же содержание в их плодах большого количества клетчатки позволяет получать из них высококачественные продукты переработки кондитерской промышленности.

Цель исследования – оценить образцы малораспространенных семечковых культур из генофонда Крымской опытно-селекционной стации (Крымская ОСС) – филиала ВИР по комплексу морфологических и консервных признаков плода, содержанию общих сахаров, выделить ценные генотипы с высокими характеристиками как для переработки плодов, так и как источники для целенаправленных селекционных программ для получения новых сортов плодовых культур с высоким качеством плодов.

Материалы и методы

На Крымскую ОСС ВИР, расположенную в северо-западных предгорьях Кавказского хребта, интродуцировано более 600 генотипов семечковых культур – яблони, груши, айвы, хеномелеса, боярышника и рябины. Они сохраняются в полевых коллекциях (*ex situ*), в которых проводится первичное изучение для определения селекционной и потребительской ценности каждого образца (Yushev et al., 2016; Eremin et al., 2019).

Исследования плодов хеномелеса, айвы и мелкоплодных яблонь проводились в 2020–2023 гг. в саду коллекции семечковых культур 2017 г. посадки по схеме 5,0 × 1,0 м. Образцы яблони (на подвое М 9), айвы (на подвое ВА 29), хеномелеса (корнесобственные) произрастают в богарных условиях. Почвы (серые лесные) содержатся под залужением.

Образцы оценивали по срокам созревания, урожайности, потребительским качествам свежих плодов: массе и внешнему виду, плотности мякоти, вкусовым достоинствам по общепринятым методикам (Sedov, Ogoltsova, 1999; Eremin, 2012). Общие сахара определялись с помощью портативного рефрактометра для фруктов и винограда (Opecation Manual 53000C) в градусах Brix (°Bx). Для определения плотности мякоти плодов использовался портативный пенетрометр Fruit Hardness Tester. Шкала прибора отградуирована в единицах килограмм-сила на квадратный сантиметр (кгс/см^2).

Технологическую переработку и оценку плодов проводили: сок с мякотью по ГОСТ 32105-2013 (GOST 32105-2013…, 2013), компот по ГОСТ Р 54680-2011 (GOST R 54680-2011…, 2013), варенье по ГОСТ 34113-2017 (GOST 34113-2017…, 2017). Экспериментальные данные обработаны методом дисперсионного анализа (Dospekhov, 1985) с использованием компьютерной программы MS Excel с надстройкой AgCStat (Gonchar-Zaikin, Chertov, 2003).

Объекты исследований

Яблоня (*Malus* Mill.): ‘Ранетка от Артюх’ (к-45363, РФ, СКЗНИИСВВ), ‘Кызыл Алма’ (в.к-7301, Казахстан, НИИС), ‘Китайка Красная’ (в.к-7259, РФ, СКЗНИИСВВ), ‘Мелкоплодная М 3’ (к-45733, РФ, СКЗНИИСВВ), ‘Мелкоплодная М 4’ (к-45734, РФ, СКЗНИИСВВ), Элита 3-39-51 (в.к-7296, РФ, Крымская ОСС ВИР), Элита 3-39-52 (в.к-7297, РФ, Крымская ОСС ВИР), Элита 3-39-54 (в.к-7298, РФ, Крымская ОСС ВИР), Элита 16-58-5 (в.к-7299, РФ, Крымская ОСС ВИР), Элита 16-58-92 (в.к-7300, РФ, Крымская ОСС ВИР). Контроль – сорт ‘Лойко’ (в.к-7282, РФ, Красноярский НИИСХ).

Хеномелес (*Chaenomeles* Lindl.):, *C. speciosa* var. *rubrum* (к-537049, Япония), ‘Wakaba’ (к-537034, *C. × superba*, США), ‘Texas Scarlet’ (в.к-9537, *C. × superba*, США), ‘Orange Trail’ (в.к-9538, *C. × superba*, США), ‘Vermilion’ (в.к-9518, *C. × superba*, США), ‘Crimson and Gold’ (в.к-9539, *C. × superba*, США), *C. × californica* var. *coidz* (к-539476, Япония). Контроль – сорт ‘Moerloosei’ (к-537043, *C. speciosa* (Sweet), Nakai, Бельгия).

Айва (*Cydonia* Mill.): ‘Нивушка’ (к-48866, РФ, СКЗНИИСВВ).

Отдаленный гибрид айвы с яблоней (*Cydonia oblonga × Malus domestica* Borkh., ВОС ВИР).

Результаты и обсуждение

Сорта и формы мелкоплодных яблонь, хеномелеса и отдаленного гибрида айвы отличаются большим биоразнообразием морфологических признаков, в том числе и качественных характеристик плода: сроки созревания, размер, окраска, вкус, плотность, сахаристость мякоти и др. (табл. 1).

По многолетним данным, в условиях юга РФ по срокам созревания плодов китаек и ранеток выделены: рано созревающие – в конце июля (26–29.07) – ‘Лойко’ и Элита 3-39-54, со средними сроками созревания – в августе (9–23.08) – ‘Кызыл Алма’, ‘Китайка Красная’, ‘Мелкоплодная М 3’, Элита 16-58-92 и поздних сроков созревания – в сентябре (07–29.09) – ‘Ранетка от Артюх’, ‘Мелкоплодная М 4’, Элита 3-39-51, Элита 3-39-52, Элита 16-58-5.

Таблица 1. Сроки созревания и качественные показатели свежих плодов мелкоплодных яблонь, хеномелеса и отдаленного гибрида айвы с яблоней в условиях юга РФ

Table 1. Ripening schedules and quality indicators of fresh fruits for crabapples, flowering quince, and the apple-quince remote hybrid under the conditions of Southern Russia

Сорт	Сроки созревания	Масса плода, г	Внешний вид, балл	Плотность мякоти, кгс/см²	Сахара, °Вх	Вкус
Яблоня						
‘Лойко’ (контроль)	26.07	18,2 ± 8,9	4,5	161	23	1*
‘Ранетка от Артюх’	29.09	17,6 ± 8,5	4,9	160	17	1*
‘Кызыл Алма’	09.08	21,8 ± 9,7	5,0	167	22	2
‘Китайка Красная’	09.08	17,9 ± 7,2	4,8	170	15	2
‘Мелкоплодная М 3’	09.08	12,1 ± 2,3	4,7	165	20	1*
‘Мелкоплодная М 4’	23.09	14,1 ± 4,5	4,9	149	19	1*
Элита 3-39-51	23.09	12,4 ± 3,2	4,8	165	18	1
Элита 3-39-52	23.09	17,3 ± 4,8	4,7	173	20	1
Элита 3-39-54	29.07	20,9 ± 5,7	4,8	175	23	1*
Элита 16-58-5	07.09	21,1 ± 5,9	4,8	168	19	1*
Элита 16-58-92	14.08	20,8 ± 4,4	4,8	167	17	1
		НСР = 3,8				
Хеномелес						
‘Moerloosei’ (контроль)	15.09	69,3 ± 34,2	4,6	198	10	3
Chaenomeles speciosa var. *rubrum*	25.09	55,8 ± 27,2	4,5	206	12	3*
‘Wakaba’	25.09	64,7 ± 32,2	4,6	189	10	3
‘Texas Scarlet’	20.09	82,7 ± 40,2	4,6	195	9	3
‘Orange Trail’	01.10	78,3 ± 36,5	4,7	201	10	3
‘Vermilion’	25.09	76,3 ± 34,5	4,5	207	11	3*
‘Crimson and Gold’	25.09	87,0 ± 39,4	4,7	198	11	3
Chaenomeles × californica var. *coidz*	20.09	74,5 ± 33,0	4,4	203	8	3*
		F_A7,8 > F_{095}2,3; НСР = 10,1				
Айва и отдаленный гибрид						
‘Нивушка’ (контроль)	15.09	183,8 ± 15,2	4,8	178	13	2
Айва × яблоня	05.09	122,4 ± 19,5	4,6	155	16	2

Примечание: вкус плода: 1 – сладковато-кислый; 2 – кисло-сладкий; 3 – кислый; * – слабо терпкий

Note: fruit taste grades: 1 – sweetish-sour; 2 – sour-sweet; 3 – sour; * – weakly tart

В результате исследований среди выделенных по морфологическим признакам и внешнему виду (4,5 балла и более) мелкоплодных яблонь выявлено разнообразие по массе плода. Средняя масса плода их варьирует от 12,1 до 21,8 г. Плоды крупнее, чем у районированного (контрольного) сорта 'Лойко', со средней массой более 20 г отмечены у образцов: 'Кызыл Алма' (21,8 г), Элита 16-58-5 (21,1 г), Элита 16-58-92 (20,8 г), Элита 3-39-54 (20,9 г). Все они красивого вида, широкоокруглой формы, светло-желтой или желтой окраски с румянцем, покрывающим от половины до всей поверхности плода, от красного до карминового цвета.

Плоды изученных сортов хеномелеса созревают во второй половине сентября (15–25.09). Масса их от среднего до выше среднего, более крупные плоды у сортов: 'Texas Scarlet' (82,7 г), 'Crimson and Gold' (87,0 г), 'Orange Trail' (78,3 г), 'Vermilion', (76,3 г), *Chaenomeles × californica* var. *coidz* (74,5 г). Окраска кожицы – от светло-желтой (*C. speciosa* var. *rubrum*), желтой ('Wakaba' и 'Texas Scarlet') до ярко-желтой ('Moerloosei'), изредка со слабым румянцем на солнечной стороне плода. Плоды отдаленного гибрида айвы с яблоней средней величины, со средней массой 122 г, плоскоокруглой формы, желтые. Поспевают они, как осенние сорта яблони, в начале сентября.

Плотность мякоти у образцов ранеток и китаек, так же как и у хеномелеса и айвово-яблоневого гибрида, на 10–50 кгс/см^2 превышает плотность мякоти культурных сортов яблони и варьирует от 149 до 175 кгс/см^2. Плоды хеномелеса более плотные (189–206 кгс/см^2), чем у мелкоплодных яблонь. Известно, что чем больше плотность мякоти, тем больше в ней растворимых сухих веществ – пектинов (Gudkovsky, 2001), которые способствуют профилактике многих заболеваний, выводят из организма человека тяжелые металлы, радионуклиды, снижают содержание холестерина.

В результате изучения сахаристости плодов ранеток в сравнении с сортами яблони домашней установлено: несмотря на более терпко-сладко-кислый вкус плодов мелкоплодных яблонь, содержание сахара в их мякоти – от 14,3 до 23,0 °Вх, что у большинства сортов превосходит данный показатель у плодов яблони домашней (9–18 °Вх). С наиболее высоким (20 °Вх и более) показателем содержания сахара в мякоти выделены генотипы: 'Лойко' (23 °Вх), Элита 3-39-54 (23 °Вх), 'Кызыл Алма' (22 °Вх), Элита 3-39-52 (20 °Вх). Вышеназванные образцы выделены как источники для селекционных программ на повышение содержания сахаров в плодах продовольственных сортов яблони (*M. domestica*).

Содержание сахаров в плодах айвово-яблоневого гибрида – 16 °Вх, он выделен по названному признаку как источник для селекционных программ для яблони. У изученных сортов хеномелеса сахара в плодах содержится 8–12 °Вх – на уровне аналогичного показателя у сортов яблони и ниже его.

Технологическая ценность сорта зависит, как правило, от консистенции мякоти, так как более плотные плоды при консервировании лучше сохраняют свою форму и привлекательный внешний вид. Учитывая высокую плотность мякоти и сахаристость, такие ценные для технологической переработки плодов признаки, как источники для целенаправленных селекционных программ по повышению сахаристости в плодах яблони выделены сорта: 'Лойко', 'Кызыл Алма', 'Мелкоплодная М 3', Элиты 3-39-52 и 3-39-54.

Лечебно-профилактические свойства малораспространенных семечковых культур проявляются в продуктах переработки, таких как сок с мякотью, компот, варенье, которые были изготовлены в лаборатории технологии Крымской ОСС с целью изучения консервных качеств плодов (рис. 1, 2).

По результатам дегустаций консервированная продукция по всем трем видам получила высокую оценку (табл. 2).

Средние показатели (4,5 балла и более) превышают оценку контрольного сорта 'Лойко' у сока с мякотью из образцов: 'Кызыл Алма', Элита 3-39-52, 'Китайка Красная', 'Мелкоплодная М 3'. Хорошую оценку компота (4,5 и более баллов) получили: 'Ранетка от Артюх', 'Кызыл Алма', 'Китайка Красная', 'Мелкоплодная М3'. Лучшие показатели (4,5 балла) у варенья из плодов образцов мелкоплодных яблонь: 'Кызыл Алма', 'Китайка Красная' и 'Мелкоплодная М 3'.

Консервная продукция (сок и варенье) из плодов отдаленного гибрида яблони с айвой вполне хорошего качества (4,2–4,4 балла). Более высокую оценку (4,0–4,3 балла) сока с мякотью и варенья получили сорта хеномелеса: 'Wakaba' и 'Texas Scarlet'. Плоды сортов хеномелеса используют также в купаже с другими плодово-ягодными культурами для повышения пищевой ценности продуктов переработки (в пюре и нектарах).

'Ранетка от Артюх' Элита 3-39-52 'Мелкоплодная М 3'

Рис. 1. Компот из плодов ранеток

Fig. 1. Compote stewed from Siberian crabapple fruits

‘Wakaba’

‘Texas Scarlet’

Рис. 2. Компот и варенье из плодов хеномелеса
Fig. 2. Compote and jam made from flowering quince fruits

Таблица 2. Оценка продуктов переработки плодов сортообразцов нетрадиционных семечковых культур, балл
Table 2. Evaluation of processed products from nontraditional pome fruit cultivars and accessions, scores

Сорт	Средний балл		
	Сок	Компот	Варенье
Яблоня			
‘Лойко’ (контроль)	4,4 ± 0,2	4,4 ± 0,3	4,4 ± 0,2
‘Ранетка от Артюх’	4,3 ± 0,6	4,5 ± 0,3	4,3 ± 0,3
‘Кызыл Алма’	4,5 ± 0,2	4,6 ± 0,3	4,5 ± 0,1
‘Китайка Красная’	4,6 ± 0,2	4,6 ± 0,4	4,5 ± 0,1
‘Мелкоплодная М 3’	4,7 ± 0,3	4,6 ± 0,1	4,5 ± 0,2
Элита 3-39-52	4,5 ± 0,3	4,1 ± 0,2	4,3 ± 0,2
Элита 16-58-5	4,4 ± 0,3	4,4 ± 0,3	4,4 ± 0,2
	НСР = 0,31	F_A3,9 > F_{095}2,3; НСР = 0,24	НСР = 0,17
Хеномелес			
‘Moerloosei’ (контроль)	3,7 ± 0,28	3,9 ± 0,35	4,1 ± 0,07
Chaenomeles speciosa var. *rubrum*	3,5 ± 0,35	3,4 ± 0,31	4,1 ± 0,63
‘Wakaba’	4,0 ± 0,49	3,5 ± 0,28	4,3 ± 0,6
‘Texas Scarlet’	4,2 ± 0,84	3,2 ± 0,14	4,2 ± 0,55
	НСР = 2,01	НСР = 2,13	НСР = 1,96
Айва и отдаленный гибрид			
‘Нивушка’ (контроль)	4,4 ± 0,32	4,5 ± 0,08	4,6 ± 0,11
Айва × яблоня	4,3 ± 0,18	4,2 ± 0,15	4,4 ± 0,13
	НСР = 0,75	F_A3,1 > F_{095}2,6; НСР = 0,63	НСР = 0,65

По всем трем видам продуктов переработки (сок с мякотью, компот, варенье) по внешнему виду, окраске, консистенции мякоти, вкусовым достоинствам лучшие показатели у сортов мелкоплодных яблонь: 'Китайка Красная', 'Мелкоплодная М3', 'Кызыл Алма', они как комплексные источники могут успешно вовлекаться в селекционные программы по улучшению вкусовых и технологических качеств плодов яблони (*Malus domestica*).

Заключение

Для профилактического питания из 18 изученных образцов мелкоплодных яблонь с комплексом положительных качеств свежих плодов (вкус, масса плода, содержание сахаров, плотность мякоти) выделены генотипы: 'Лойко' (в.к-7282), 'Кызыл Алма' (в.к-7301), 'Мелкоплодная М 3' (к-45733), Элита 16-58-5 (в.к-7299) и Элита 3-39-54 (в.к-7298). По привлекательному внешнему виду плодов (яркая окраска кожицы от светло-зеленой до желтой, большой яркий румянец и блеск) выделены образцы мелкоплодных яблонь: 'Ранетка от Артюх' (к-45363), 'Кызыл Алма', 'Мелкоплодная М 4' (к-45734), Элита 3-39-54, Элита 16-58-5 и Элита 16-58-92 (в.к-7300).

В результате анализа органолептических свойств продукции переработки плодов сортообразцов малораспространенных семечковых культур выделены генотипы, плоды которых наиболее перспективны для консервирования (сок с мякотью, компот, варенье): яблоня – 'Кызыл Алма', 'Китайка Красная' (в.к-7259), 'Мелкоплодная М 3'; хеномелес – 'Wakaba' (к-537034) и 'Texas Scarlet' (в.к-9537).

В связи с важнейшей задачей селекции – создания новых сортов плодовых культур – вышеназванные образцы ранеток, китаек и хеномелеса, учитывая их высокие качественные характеристики плода, выделены как источники привлекательного внешнего вида, плотной мякоти, повышенного содержания сахаров для целенаправленных селекционных программ по выведению сортов яблони как для употребления в свежем виде, так и для консервирования.

References / Литература

Chepinoga I.S., Kovalenko N.N. Introduction and study of decorative properties and adaptivity of chenomeles (*Chaenomeles* Lindl.) in Kuban. In: *Breeding, Seed Production and Technology of Fruit, Berry and Vegetable Crops, and Potatoes: Collection of Scientific Papers. Vol. 19 (Selektsiya, semenovodstvo i tekhnologiya plodovo-yagodnykh, ovoshchnykh kultur i kartofelya: sbornik nauchnykh trudov. T. 19)*. Chelyabinsk: South Ural Research Institute of Horticulture and Potato Growing; 2017. p.184-197. [in Russian] (Чепинога И.С., Коваленко Н.Н. Интродукция и изучение декоративных свойств и адаптивности хеномелиса (*Chaenomeles* Lindl.) на Кубани. В кн.: *Селекция, семеноводство и технология плодово-ягодных, овощных культур и картофеля: сборник научных трудов. Т. 19.* Челябинск: Южно-Уральский научно-исследовательский институт садоводства и картофелеводства; 2017. С.184-197).

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).

Droficheva N.V., Prichko T.G., Kovalenko N.N. Selection of raw materials for the production of multicomponent functional food products (Podbor syrya dlya proizvodstva mnogokomponentnykh funktsionalnykh produktov pitaniya). In: *Scientific Support for the Agro-Industrial Complex: Proceedings of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference for Young Scientists; Krasnodar, November 24–26, 2010 (Nauchnoye obespecheniye agropromyshlennogo kompleksa: materialy IV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh; Krasnodar, 24–26 noyabrya 2010 goda)*. Krasnodar; 2010. p.254-255. [in Russian] (Дрофичева Н.В., Причко Т.Г., Коваленко Н.Н. Подбор сырья для производства многокомпонентных функциональных продуктов питания. В кн.: *Научное обеспечение агропромышленного комплекса: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых; Краснодар, 24–26 ноября 2010 года*. Краснодар; 2010. С.254-255).

Eremin G.V. (ed.). Contemporary methodological aspects of the organization of the breeding process in horticulture and viticulture (Sovremennye metodologicheskiye aspekty organizatsii selektsionnogo protsessa v sadovodstve i vinogradarstve). Krasnodar; 2012. [in Russian] (Современные методологические аспекты организации селекционного процесса в садоводстве и виноградарстве / под ред. Г.В. Еремина. Краснодар; 2012).

Eremin G.V., Gasanova T.A., Eremin V.G., Chepinoga I.S. Experience in preserving the genetic diversity of stone fruits using the border hedging technology. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2019;180(2):7-11. [in Russian] (Еремин Г.В., Гасанова Т.А., Еремин В.Г., Чепинога И.С. Опыт хранения генофонда косточковых культур по технологии «бордюр». *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2019;180(2):7-11). DOI: 10.30901/2227-8834-2019-2-7-11

Gonchar-Zaikin P.P., Chertov V.G. Add-in to EXCEL for statistical assessment and analysis of the results of field and laboratory experiments (Nadstroyka k EXCEL dlya statisticheskoy otsenki i analiza rezultatov polevykh i laboratornykh opytov). In: *Sustainable Environment Management and Agricultural Production in the Southern Regions of the Russian Federation (Ratsionalnoye prirodopolzovaniye i selskokhozyaystvennoye proizvodstvo v yuzhnykh regionakh Rossiyskoy Federatsii).* Moscow: Sovremennye Tetradi; 2003. p.559-565. [in Russian] (Гончар-Зайкин П.П., Чертов В.Г. Надстройка к EXCEL для статистической оценки и анализа результатов полевых и лабораторных опытов. В кн.: *Рациональное природопользование и сельскохозяйственное производство в южных регионах Российской Федерации*. Москва: Современные тетради; 2003. С.559-565).

GOST 32105-2013. Interstate standard. Canned foods. Juice products. Fruit, fruit and vegetable juice containing beverages. General specifications. Moscow: Standartinform; 2013. [in Russian] (ГОСТ 32105-2013. Межгосударственный стандарт. Консервы. Продукция соковая. Напитки сокосодержащие фруктовые и фруктово-овощные. Общие технические условия. Москва: Стандартинформ; 2013). URL: https://docs.cntd.ru/document/1200104863 [дата обращения: 17.09.2025].

GOST 34113-2017. Interstate standard. Jams. General specifications. Moscow: Standartinform; 2017. [in Russian] (ГОСТ 34113-2017. Межгосударственный стандарт. Варенье. Общие технические условия. Москва:

Стандартинформ; 2017). URL: https://docs.cntd.ru/document/1200156810 [дата обращения: 17.09.2025].

GOST R 54680-2011. National standard of the Russian Federation. Canned foods. Compotes. General specifications. Moscow: Standartinform; 2013. [in Russian] (ГОСТ Р 54680-2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Консервы. Компоты. Общие технические условия. Москва: Стандартинформ; 2013). URL: https://docs.cntd.ru/document/1200094366 [дата обращения: 17.09.2025].

Gudkovsky V.A. Antioxidant (healing) properties of fruits and berries and progressive methods of their storage (Antiokislitelnye (tselebnye) svoystva plodov i yagod i progressivnye metody ikh khraneniya). *Storage and Processing of Farm Products*. 2001;(4):13-19. [in Russian] (Гудковский В.А. Антиокислительные (целебные) свойства плодов и ягод и прогрессивные методы их хранения. *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2001;(4):13-19).

Karbyshev M.S., Abdullaev Sh.P. Biochemistry of oxidative stress: a teaching aid and guidelines (Biokhimiya oksidativnogo stressa: uchebno-metodicheskoye posobiye). Moscow; 2018). [in Russian] (Карбышев М.С., Абдуллаев Ш.П. Биохимия оксидативного стресса: учебно-методическое пособие. Москва; 2018).

Kornilov B.B., Ozherelieva Z.E. Winter hardiness and drought resistance of some genotypes of ornamental apple from VNIISPK collection. *Contemporary Horticulture*. 2017;4(24):49-56. [in Russian] (Корнилов Б.Б., Ожерельева З.Е. Зимостойкость и засухоустойчивость некоторых форм декоративной яблони генофонда ФГБНУ ВНИИСПК. *Современное садоводство*. 2017;4(24):49-56). DOI: 10.24411/2218-5275-2017-00032

Makarenko S.A. Comparative assessment of the biochemistry of apple fruits of Altai varieties as a source of nutritious and biologically active substances. *Chemistry of Plant Raw Material*. 2021;(3):245-252. [in Russian] (Макаренко С.А. Сравнительная оценка биохимии плодов яблони алтайских сортов как источника питательных и биологически активных веществ. *Химия растительного сырья*. 2021;(3):245-252). DOI: 10.14258/jcprm/2021039177

Prichko T.G., Droficheva N.V., Kovalenko N.N. Japonica (henomelis mauleya) – biologically valuable raw material for producing food functionality. *Food Industry*. 2014;(9):25-27. [in Russian] (Причко Т.Г., Дрофичева Н.В., Коваленко Н.Н. Айва японская (хеномелес маулея) – биологически ценное сырье для создания продуктов питания функционального назначения. *Пищевая промышленность*. 2014;(9):25-27).

Pricko T.G., Droficheva N.V., Kovalenko N.N. The use of *Chaenomeles* fruits in the production of functional beverages. *Fruit Growing and Viticulture of South Russia*. 2023;81(3):309-321. [in Russian] (Причко Т.Г., Дрофичева Н.В., Коваленко Н.Н. Плоды хеномелеса в производстве напитков функционального назначения. *Плодоводство и виноградарство Юга России*. 2023;81(3):309-321). DOI: 10.30679/2219-5335-2023-3-81-309-321

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).

Yushev A.A., Sorokin N.A., Tikhonova O.A., Orlova S.Yu., Kislin E.N., Radchenko O.E., Pupkova N.A., Shlyavas A.V. The collection of fruit and berry plant genetic resources: preservation, replenishment, and study. Guidelines (Kollektsiya geneticheskikh resursov plodovykh i yagodnykh rasteniy: sokhraneniye, popolneniye, izucheniye. Metodicheskiye ukazaniya). A.A. Yushev, I.G. Chukhina (eds). St. Petersburg: VIR; 2016. [in Russian] (Юшев А.А., Сорокин Н.А., Тихонова О.А., Орлова С.Ю., Кислин Е.Н., Радченко О.Е., Пупкова Н.А., Шлявас А.В. Коллекция генетических ресурсов плодовых и ягодных растений: сохранение, пополнение, изучение. Методические указания / под. ред. А.А. Юшева, И.Г. Чухиной. Санкт-Петербург: ВИР; 2016).

Информация об авторах

Ирина Семеновна Чепинога, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий 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, iris_57@list.ru, https://orcid.org/0000-0001-7215-9908

Анна Владимировна Тихонова, младший 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, 9531167616Anna@mail.ru

Information about the authors

Irina S. Chepinoga, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Krymsk Experiment Breeding Station – branch of VIR, 12 Vavilova St., Krymsk 353384, Russia, iris_57@list.ru, https://orcid.org/0000-0001-7215-9908

Anna V. Tikhonova, Associate Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources Krymsk Experiment Breeding Station – branch of VIR, 12 Vavilova St., Krymsk 353384, Russia, 9531167616Anna@mail.ru

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 18.05.2026.
The article was submitted on 22.10.2025; approved after reviewing on 13.12.2025; accepted for publication on 18.05.2026.

ОБЗОРЫ

Обзорная статья
УДК 633.1:631.52
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o6

CC BY

Генетико-методологические аспекты изучения морозоустойчивости озимой пшеницы

А. В. Федяева

Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Анна Валерьевна Федяева, fedyaeva.anna@mail.ru

Пшеница – одна из важнейших зерновых культур, эффективность производства которой имеет большое значение для продовольственной безопасности. Научные исследования последних лет привели к созданию новых, устойчивых к воздействию абиотических факторов среды сортов пшеницы. Использование таких сортов в сочетании с применением современных технологий возделывания этой культуры способствует значительному повышению ее урожайности. Данный обзор посвящен в основном исследованиям последних двадцати лет в области генетики и физиологии, которые направлены на изучение морозоустойчивости озимой пшеницы. В работе представлены сведения об основных механизмах передачи сигнала на холодовое воздействие, активации экспрессии ключевых генов/QTLs, участвующих в развитии морозоустойчивости у озимой пшеницы. Так, в отдельном разделе рассмотрены работы, которые посвящены наиболее изученному на настоящий момент сигнальному пути холодовой акклиматизации, а именно сигнальному пути ICE1–CBF–COR. Приведены главные методы оценки растений озимой пшеницы по уровню морозоустойчивости, которые могут быть применены как для полевых, так и для лабораторных исследований. Оценено применение полногеномного поиска ассоциаций (GWAS) как подхода для анализа морозоустойчивости. Рассмотрена роль отдельных генов и QTLs в развитии холодо- и морозоустойчивости, а также методы их оценки.

Ключевые слова: *Triticum aestivum* L., экспрессия генов, сигнальный путь ICE–CBF–COR, методы оценки, GWAS

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-24-00117 «Генетические детерминанты морозоустойчивости мягкой озимой пшеницы в условиях Западной Сибири» (https://rscf.ru/project/25-24-00117/).
Автор выражает благодарность ведущему научному сотруднику лаборатории молекулярной генетики и цитогенетики растений ИЦиГ СО РАН, д-ру биол. наук А. Б. Щербаню за помощь и ценные советы при написании данного обзора.

Для цитирования: Федяева А.В. Генетико-методологические аспекты изучения морозоустойчивости озимой пшеницы. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(2):243-252. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o6

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.

© Федяева А.В., 2026

SURVEYS

Review article
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o6

Genetic and methodological aspects of studying frost resistance in winter wheat

Anna V. Fedyaeva

Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Corresponding author: Anna V. Fedyaeva, fedyaeva.anna@mail.ru

Wheat is a major cereal crop, and its efficient production is crucial for food security. Recent scientific research has led to the development of new wheat cultivars, more resistant to abiotic factors. Exploiting such cultivars together with modern technologies contributes to a significant increase in wheat yield. This review is dedicated to studies in the field of genetics and physiology, conducted over the past twenty years and aimed at studying frost resistance in winter wheat. It presents the latest information on the main mechanisms of signal transmission in plants under cold exposure, and the activation of key genes/QTLs involved in the development of frost resistance in winter wheat. One of the sections highlights the studies focusing on the most studied cold acclimation signaling pathway to date, namely the ICE1–CBF-COR signaling pathway. The main methods for assessing winter wheat plants according to their frost resistance are presented; they can be applied for both field and laboratory tests. The genome-wide association studies (GWAS) as an approach to analyzing frost resistance in winter wheat are evaluated. The role of individual genes and QTLs in the development of the crop's frost resistance is considered, and methods of assessing this tolerance are discussed.

Keywords: *Triticum aestivum* L., gene expression, ICE–CBF–COR signaling pathway, evaluation methods, GWAS

Acknowledgments: this work was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 25-24-00117 "The genetic determinants of frost resistance soft winter wheat in Western Siberia" (https://rscf.ru/project/25-24-00117/).
The author is grateful to Dr. A. B. Shcherban, Leading Researcher at the Molecular Genetics and Plant Cytogenetics Laboratory of the Institute of Cytology and Genetics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, for his assistance and valuable advice during the writing of this review.

For citation: Fedyaeva A.V. Genetic and methodological aspects of studying frost resistance in winter wheat. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(2):243-252. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-2-o6

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

Мягкая пшеница (*Triticum aestivum* L.) – молодой гексаплоидный вид, который образовался примерно 8500–9000 лет назад (Levy, Feldman, 2022). Наряду с ячменем пшеница – одна из самых возделываемых зерновых культур, уборочная площадь которой в 2021 г. составляла порядка 220 млн га, а общее производство зерна – 770 млн т (Caccialupi et al., 2023). Согласно данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (ФАО) (Food and Agriculture Organization, FAO), уборочная площадь пшеницы в 2023 г. на территории России составила порядка 28,8 млн га с производством зерна 91,5 млн т.

Вероятно, широкое мировое распространение мягкой пшеницы, а также ее приспособленность к различным климатическим условиям стали возможными благодаря аллополиплоидной природе ее генома, который в сравнении с геномами диплоидных или тетраплоидных видов пшеницы имел более высокий потенциал для адаптации. Дополнительные, гомеологичные копии генов обеспечивают, с одной стороны, сохранение различных мутаций в отдельных копиях, а с другой – возможности взаимодействия различных гомеологичных аллелей в процессе формирования новых признаков (Levy, Feldman, 2022). Так, зимостойкость – это одна из жизненно важных адаптаций пшеницы в умеренном климате, в условиях отрицательной температуры зимнего периода (Song et al., 2023). Зимостойкость включает целый комплекс признаков, таких как морозостойкость/морозоустойчивость, устойчивость к выпиранию, выпреванию, зимним оттепелям и т. д. (Dorofeev et al., 2004). В литературе обычно под морозостойкостью/морозоустойчивостью понимают способность растений выживать под действием отрицательной температуры, которая приводит к образованию межклеточного и внеорганного льда (Trunova, 2007). Под выпиранием обычно понимают поднятие узла кущения вспученной почвой; при этом происходят разрывы мелких корней, а в процессе оттаивания почва оседает, и узел кущения с частью корней остаются оголенными. Выпревание возникает из-за высокого снежного покрова и неглубокого промерзания почвы с последующим поражением посевов снежной плесенью (Korsukova, 2016). При селекции на зимостойкость используют мутации по генам, ответственным за процесс яровизации, или *VRN*-генам. Яровизация представляет собой необходимую для инициации цветения физиологическую реакцию растения на воздействие низких положительных температур (Galiba et al., 2009; Levy, Feldman, 2022; Song et al., 2023). Индукция цветения – это одна из ключевых стадий развития растения, запуск которой происходит в ответ на сезонные изменения фотопериода и температуры; она контролируется генотипом. Так, у растений озимой пшеницы механизм устойчивости к холоду имеет фундаментальную связь с необходимостью яровизации, поскольку требуется задержка перехода от вегетативной стадии развития к репродуктивной на весь зимний период. Это обуславливает необходимость приобретения растением холодоустойчивости (Kosová et al., 2021; Bolouri et al., 2023). Более длительный период роста озимых злаков до цветения, в сравнении с яровыми, позволяет им увеличивать урожайность, и в связи с этим выращивание озимых в отдельных климатических зонах перспективнее, чем яровых зерновых культур. Ранее было установлено, что устойчивость к холоду напрямую зависит от эффективности процесса холодовой акклиматизации, или «холодового закаливания» (Gabor et al., 2013). В ходе воздействия низких закаливающих температур у холодо- и морозостойких растений происходит активация различных метаболических путей, приводящих к изменению уровней фенольных соединений, сахаров, растворимых белков, появлению новых изоформ ферментов, накоплению пролина, органических кислот, модификации состава жирных кислот в фосфолипидной мембране, а также к повышению уровня антиоксидантов (Caccialupi et al., 2023). Все эти изменения направлены на защиту узлов кущения, а также молодых листьев от повреждения межклеточным и внеорганным льдом, который образуется в период холодового воздействия, что позволяет данным морфологическим структурам сохранить потенциал к восстановлению по окончании этого периода. Именно эта способность и определяется термином морозостойкость/морозоустойчивость (Trunova, 2007).

До XXI века понимание свойств холодо- и морозостойкости растений базировалось в основном на физиологических и биохимических исследованиях. За последние 20 лет были идентифицированы гены, контролирующие данные признаки, и кодируемые ими белки, достаточно подробно изучены сигнальные системы и пути регуляции экспрессии этих генов в ответ на низкотемпературный стрессор. Однако до сих пор окончательно не ясна общая картина молекулярно-генетической регуляции холодо- и морозостойкости на уровне всего растения в ответ на различные температурные воздействия (Trunova, 2007; Sandve et al., 2011; Guo et al., 2019). В методическом плане полевой метод изучения морозоустойчивости имеет ряд ограничений, связанных с тем, что на растения воздействуют как очень переменчивые условия окружающей среды (колебания температуры, изменения в продолжительности светового дня), так и дополнительные факторы стресса, которые могут быть вызваны кратковременной засухой или, наоборот, чрезмерным увлажнением почвы, недостатком отдельных питательных веществ, механическим повреждением, патогенами (Kosová et al., 2021). Поэтому для корректной оценки и выявления различий в ответной реакции на холод у сортов отдельных видов злаковых культур применяется комплексный подход, когда наряду с полевыми методами оценки используют лабораторные тесты (Frederiks et al., 2012; Kosová et al., 2021). Несмотря на то что в последнее время появляются новые технологии и методы анализа холодового воздействия, до сих пор не существует единого универсального комплекса методов для более эффективного отбора морозоустойчивых сортов озимых злаков. *Цель данного обзора* – рассмотреть некоторые из современных результатов исследований: пути передачи низкотемпературного сигнала, роль отдельных генов и локусов количественных признаков (quantitative trait loci, QTLs), которые участвуют в ответной реакции на холодовое воздействие, полевые и лабораторные методы для оценки холодо- и морозоустойчивости у озимой пшеницы.

Роль генов и QTLs в развитии морозоустойчивости

Несмотря на то что активируемые холодом сигнальные пути хорошо изучены, пока окончательно не установлены рецепторные механизмы восприятия низких температур (Shi et al., 2015; Caccialupi et al., 2023). Известно, что низкие температуры приводят к изменению текучести мембран и к накоплению вторичных мессендже-

ров, таких как ионы Ca^{2+}, одними из возможных первичных сенсоров которых являются Ca^{2+}-каналы плазматической мембраны (Shi et al., 2015). После поступления ионов Ca^{2+} в цитозоль и его связывания с кальциевыми сенсорами происходит активация кальций-связывающих белков (calcium-binding proteins, CBPs), которые, в свою очередь, активируют относящиеся к семейству MYC и подсемейству MYC bHLH (basic helix – loop – helix) факторы транскрипции ICE (inducer of CBF expression) (Caccialupi et al., 2023). Последние индуцируют транскрипцию генов *CBF* (C-repeat binding factor) (Miura, Furumoto, 2013), выполняющих важную роль в регуляции COR-генов (cold-regulated genes, COR), или генов, регулируемых холодом (Vítámvás et al., 2007). К COR-генам относятся гены, ответственные за синтез белков позднего эмбриогенеза (late embryogenesis abundant proteins, LEA), индуцируемые низкой температурой (low-temperature-induced, LTI) / холодом (cold-inducible, KIN) (Jin et al., 2018), а также ранней дегидратацией (early dehydration-inducible, ERD) (Caccialupi et al., 2023). Данные гены участвуют в защите клетки от неблагоприятных последствий, связанных с потерей воды, путем биосинтеза осмопротекторных белков, влияющих на метаболизм углеводов и транспорт сахаров (Kamata, Uemura, 2004; Heidarvand, Maali Amiri, 2010; Akhtar et al., 2012; Caccialupi et al., 2023). В настоящее время наиболее изученным сигнальным путем холодовой акклиматизации считается транскрипционный каскад ICE1–CBF/REB1–COR, который регулируется на различных уровнях: транскрипционном, посттранскрипционном и посттрансляционном (рисунок) (Miura, Furumoto, 2013; Shi et al., 2015). Исследователями было показано, что два разных MYCbHLHICE (TaICE41 или TaICE87), которые были идентифицированы у пшеницы, повышают устойчивость к воздействию отрицательной температуры –10,5°C после периода закаливания трансгенных растений арабидопсиса (Badawi et al., 2008).

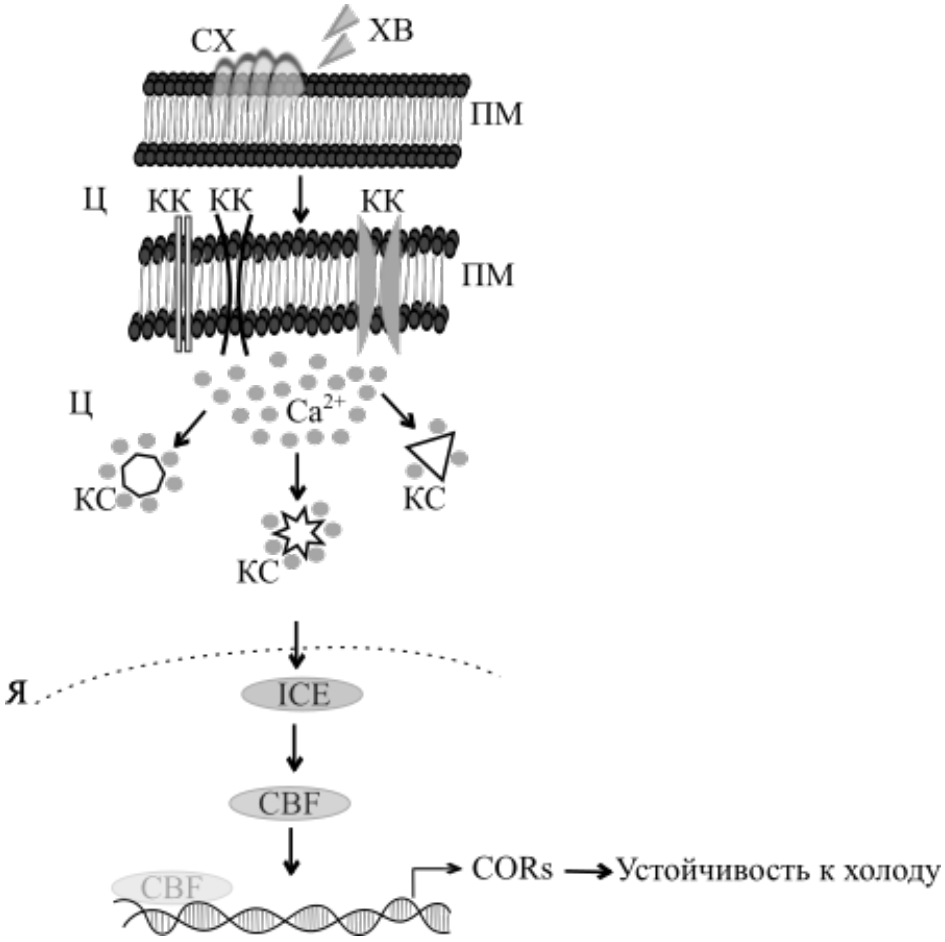


Рисунок. Схема передачи сигнала в растительной клетке в ответ на холодовое воздействие: ХВ – холодовое воздействие; **ПМ** – плазматическая мембрана; **Ц** – цитоплазма; **СХ** – сенсор холода; **КК** – Ca^{2+}-каналы плазматической мембраны; **КС** – кальциевый сенсор; **Я** – ядро; **ICE** – транскрипционный фактор ICE (inducer of CBF expression); **CBF** – транскрипционный фактор CBF (C-repeat binding factor); **CORs** – регулируемые холодом гены (cold-regulated genes)

Figure. The scheme of signal transduction in the plant cell in response to cold exposure: XB – cold exposure; **ПМ** – plasma membrane; **Ц** – cytoplasm; **СХ** – cold sensor; **КК** – plasma membrane Ca^{2+} channels; **КС** – Ca-sensors; **Я** – nucleus; **ICE** – inducer of CBF expression; **CBF** – C-repeat binding factor; **CORs** – cold-regulated genes

Позднее, с появлением референсной последовательности генома пшеницы, Guo Jie с соавторами идентифицировали три гена *TaICE1*, расположенные в длинных плечах хромосом 3A, 3B и 3D, и показали зависимость уровня их транскрипции от степени холодового воздействия (Guo et al., 2019). Установлено, что транскрипционные факторы CBF, или связывающие элементы ответа на дегидратацию – DREB1 (dehydration responsive element-binding factor 1), относятся к одному из подсемейств, входящих в состав большого семейства APETALA2/этилен-чувствительных факторов (APETALA2/ethylene respon-

sive element-binding factors; AP2/ERF) (Caccialupi et al., 2023). Активация данных факторов происходит в ответ на осмотический стресс, который развивается при воздействии холода и засухи. При этом, как было показано, домен AP2/ERF связывается с цис-элементами CRT/DRE (C-repeat/dehydration responsive elements, CRT/DRE), расположенными в промоторной области различных генов и вовлеченными в абиотический ответ (Lyusikov et al., 2022; Caccialupi et al., 2023). Ранее было выявлено, что у представителей семейства Poaceae Barnh. гены *CBF* подразделяются на 10 групп, имеют общее филогенетическое происхождение и схожие структурные характеристики. Все они представлены короткими (около 700 пн) моноэкзонными кодирующими последовательностями (Badawi et al., 2007; Galiba et al., 2009). Кроме того, было установлено, что шесть групп *CBF*-генов (IIIc, IIId, IVa, IVb, IVc и IVd) встречаются только у видов, относящихся к подсемейству Pooideae Benth., а виды *Triticum aestivum* L. и *T. monococcum* L. могут содержать до 25 различных генов *CBF* (Badawi et al., 2007). За последние 20 лет, благодаря развитию технологий секвенирования геномов, количество идентифицированных генов *CBF* существенно возросло. По данным Международного консорциума по секвенированию генома пшеницы (IWGSC) (https://www.wheatgenome.org; International Wheat Genome Sequencing Consortium et al., 2018), у мягкой пшеницы выявлены 54 гена *CBF*, которые расположены в пятой гомеологичной группе хромосом, а именно: 17, 19 и 18 генов в хромосомах 5A, 5B и 5D соответственно. Другие *CBF*-гены локализованы в хромосомах шестой гомеологичной группы (International Wheat Genome Sequencing Consortium et al., 2018; Caccialupi et al., 2023). Гены *CBF* активируются достаточно быстро после воздействия низкими температурами. Так, у пшеницы увеличение уровней транскриптов *CBF* наблюдали уже через 4–12 часов после воздействия холодом (Jin et al., 2018). Было показано, что гены *CBF* индуцируются не только под действием холода: также их регуляция зависит от циркадных ритмов (Fowler S. et al., 2005) и, вероятно, характеристик света.

В ряде исследований были картированы локусы количественных признаков (quantitative trait loci, QTLs) путем скрещивания образцов, контрастных по уровню транскрипции отдельных генов (*COR14b*, *WCS120*), участвующих в устойчивости растений к низким положительным и отрицательным температурам (Vagujfalvi et al., 2003; Galiba et al., 2009). Обнаружено, что QTL для гена *COR14b* перекрывается с QTL, ответственным за устойчивость к воздействию низких отрицательных температур и локализованным в хромосоме 5A. Локус, соответствующий области перекрывания, был обозначен как *FR-2* (*Frost Resistance 2*) (Vagujfalvi et al., 2003; Michel et al., 2019). Данный локус охватывает кластер генов, кодирующих транскрипционные факторы семейства CBF, которые, как указано выше, участвуют в акклиматизации к холоду и развитии морозостойкости у пшеницы (Caccialupi et al., 2023). Использование транскрипционного профилирования и картирования высокой плотности позволили идентифицировать возможные гены – кандидаты на морозоустойчивость в кластере FR-2-CBF (Galiba et al., 2009). Кроме локуса *FR-2*, у представителей Triticeae Dum. морозоустойчивость определяется локусом *FR-1*, тесно сцепленным с геном *VRN-1* (Galiba et al., 2009; Kosová et al., 2021; Caccialupi et al., 2023). Известно, что одним из трех основных генов, контролирующих яровизацию, является ген *VRN-1* (Dhillon et al., 2010; Caccialupi et al., 2023). Локус *FR-1*, как и *FR-2*, расположен в длинном плече одной из хромосом пятой гомеологичной группы (Galiba et al., 2009; Kosová et al., 2021; Caccialupi et al., 2023).

Известно, что пшеница характеризуется высокой изменчивостью признака «морозоустойчивость», гексаплоидные генотипы пшеницы (геном AABBDD) проявляют большую морозостойкость, чем диплоидные (AA) и тетраплоидные генотипы (AABB). Первые работы по оценке уровня морозоустойчивости проводились на диплоидной пшенице (*T. monococcum*) (Caccialupi et al., 2023). В работе A. Vagujfalvi с соавторами большинство изученных генов в локусе *FR-A2* у пшеницы индуцировались холодовой обработкой (2°C, 2 ч), при этом наибольшие уровни транскрипционной активности были зафиксированы для генов *TaCBF14* и *TaCBF15* (Vagujfalvi et al., 2005; Galiba et al., 2009). Позже было показано, что на морозостойкость гексаплоидной и тетраплоидной пшеницы могут оказывать влияние вариации числа копий (copy number variation, CNV) гена *CBF-A14* (Zhu et al., 2014; Sieber et al., 2016; Würschum et al., 2017). Следует отметить, что акклиматизация к холоду у пшеницы происходит в широком диапазоне пороговых пониженных температур и является генотип-специфичной (Fowler D., 2008). Так, для запуска данного процесса у разных сортов озимой пшеницы достаточно воздействия температурой 8–10°C в течение четырех недель (Cha et al., 2022). Кроме того, было выявлено, что важную роль в регуляции устойчивости растений к воздействию холода, как CBF-зависимым, так и CBF-независимым путем, играют гормоны, такие как ауксин, абсцизовая кислота, этилен, цитокинины, гиббереллины, жасмоновая кислота и брассиностероиды (Shi et al., 2015). Таким образом, на настоящий момент определены основные ключевые гены и сигнальные пути, которые вовлечены в развитие морозоустойчивости у злаковых культур. Однако, поскольку реакция на холодовой стрессор, как и на многие другие абиотические стрессоры, имеет чрезвычайно сложную природу и контролируется комплексом генетических и средовых факторов, это обуславливает невысокую эффективность селекции по данному признаку с использованием традиционных подходов. Данную проблему можно решать, применяя современные физиологические и генетические подходы.

Подходы, применяемые для оценки холодо- и морозоустойчивости у озимой пшеницы

Воздействие низких положительных и отрицательных температур как в период вегетативной, так и в период репродуктивной стадии развития зерновых может привести к большим экономическим потерям. На сегодняшний день методы, используемые для оценки холодо- и морозоустойчивости, можно отнести к двум категориям: полевые и лабораторные (Frederiks et al., 2012). Так, формирование морозоустойчивости за счет процесса холодовой акклиматизации часто оценивают по температуре, которая вызывает 50-процентную гибель образца (ЛТ50). Данный показатель может быть определен двумя путями. В первом случае растительные образцы оценивают по количеству выживших после чередования процессов «заморозки – оттаивания», в этом случае растения сначала подвергают воздействию низкой отрицательной температурой, а после этого температуру повышают до контрольных значений. А во втором случае определение ЛТ50 происходит за счет оценки поврежде-

ния растительных тканей посредством утечки электролита (Kosová et al., 2021). Критерием состояния жизнеспособности в этом случае может служить величина относительной электропроводности, свидетельствующая о степени повреждения клеточных мембран. Данная величина определяется как соотношение величины выхода электролита до кипячения к его выходу после кипячения. При значительном отмирании тканей растений детектируется высокая удельная электропроводность (Kamata et al., 2004; Panasin et al., 2017). Поскольку ключевыми индуцирующими факторами процесса холодовой акклиматизации являются температура и световой период, данные экспериментальные исследования корректно проводить в лабораторных условиях с применением климатических камер, в которых регулируется температура, освещение, влажность и другие параметры. На настоящий момент подобные климатические камеры используют при моделировании экспериментов для изучения влияния холода как на экспрессию ключевых генов, которые индуцируются холодом, так и на изменение основных клеточных и физиологических параметров, а также для проведения отбора сортов по изучаемому признаку (Kamata et al., 2004; Kovacs et al., 2011; Armonienė et al., 2013; Todorovska et al., 2014; Michel et al., 2019). Однако в большинстве случаев различия сортов по уровню их зимостойкости и морозоустойчивости оцениваются в полевых условиях. При этом нужно учитывать, что в зимние месяцы на растения действует целый комплекс стрессоров: низкие положительные температуры, низкие отрицательные температуры, изменение водного режима, механические повреждения и другие стрессоры (Trunova, 2007). Изучение эффекта множественных стрессовых факторов на растения показало, что их суммарный эффект не равен сумме эффектов отдельных факторов, поэтому важно изучение морозоустойчивости как в искусственных, контролируемых условиях, так и в полевых условиях (Mittler, 2006). Таким образом, совокупность ряда воздействующих экологических факторов определяет окончательную зимостойкость озимых культур; данный сложный фенотипический признак оценивается как процент выживших растений зимой. Оценка морозоустойчивости сортов, как в лабораторных условиях, так и при полевых испытаниях, была и остается трудоемким и дорогостоящим этапом селекции на зимостойкость. Поэтому поиск других методов адекватной оценки этого признака является актуальным (Plotnikov et al., 2014).

Известно, что яровые и озимые сорта пшеницы имеют различия в индукции генов регуляторного пути CBF-COR/LEA. Так, у озимых наблюдаются более высокие уровни экспрессии генов *CBF* после холодового воздействия (Deryabin et al., 2024). Поэтому параллельно определению выживаемости растений при воздействии холода может проводиться оценка уровня транскриптов генов *COR/LEA*, а также анализ содержания отдельных COR/LEA-белков; при этом они могут быть использованы как два отдельных подхода при изучении морозоустойчивости озимых зерновых культур. Разные исследования, проведенные в контролируемых условиях, показали, что наблюдается значительная положительная корреляция между аккумуляцией транскриптов генов *COR/LEA*, повышением содержания отдельных COR/LEA-белков и приобретенной морозоустойчивостью (Kosová et al., 2021). Было выявлено, что холодоустойчивые озимые сорта имеют большее число копий генов *CBF* в локусе *FR-2* по сравнению с холодочувствительными яровыми сортами (Kosová et al., 2021). В работе S. Kume с соавторами показано, что повышенные уровни транскриптов генов *WCBF2*, *Wdhn13*, *Wcor14* и *Wcor15* были выявлены у морозоустойчивого озимого сорта пшеницы – ‘Мироновская 808’, по сравнению с менее устойчивым к низким отрицательным температурам яровым сортом пшеницы – ‘Chinese Spring’ (Kume et al., 2005). Белок WCBF2 регулирует транскрипцию генов *Cor/Lea* и тем самым играет важную роль в развитии устойчивости растений пшеницы к низким температурам (Takumi et al., 2008). К числу данных генов относится ген *Wdhn13*, который кодирует дегидрин с одноименным названием (WDHN13). Дегидрины входят во вторую группу белков позднего эмбриогенеза (LEA II) и считаются одними из наиболее изученных LEA-белков. Показано, что данные белки играют важную роль в обеспечении толерантности растений к низким температурам, которые действуют как молекулярные шапероны, а также выполняют криопротекторную и антиоксидантную функцию (Ohno et al., 2003; Ganeshan et al., 2008; Kosová et al., 2021). Продуктами генов *Wcor14* и *Wcor15* являются белки WCOR14 и WCOR15, основная функция которых заключается в защите хлоропластов при холодовом воздействии (Shimamura et al., 2006). Кроме того, холодоустойчивые сорта озимой пшеницы, по сравнению с чувствительными к холоду сортами, имеют более высокие положительные пороговые значения по температуре, которые необходимы для запуска индукции генов *CBF* и, как следствие, накопления белков COR/LEA. Ранее было показано, что воздействие температурами 17–20°C на холодоустойчивые сорта пшеницы уже достаточно для накопления холодо-индуцируемого белка WCS120 (Vítámvás et al., 2010; Kosová et al., 2013; Kosová et al., 2021). Параллельно определению накопления белков (COR/LEA) может проводиться анализ состава отдельных белков (COR/LEA). Так, в условиях Восточной Сибири были обнаружены различия по качественному составу анализируемых дегидринов у трех озимых растений из семейства Poaceae: ржи, пшеницы и тритикале. Авторы обнаружили наличие дегидрина с молекулярной массой 29 кДа лишь в осенних образцах озимой пшеницы, тогда как в образцах, которые были собраны зимой и весной, его не нашли (Pomortsev et al., 2017). При этом накопление белков происходило значительно позже, чем повышение уровня транскриптов *COR/LEA*-генов: через 2–3 недели после воздействия холодом (Ohno et al., 2003; Ganeshan et al., 2008). В настоящий момент на основании данных литературы можно заключить, что определение белков в узлах кущения озимых злаков, наряду с оценкой экспрессии отдельных генов, можно использовать как подход не только для оценки уровня перезимовки отдельных сортов, но и для отбора наиболее морозоустойчивых сортов. Так, наблюдали прямую корреляцию между высоким уровнем накопления белка дегидрина и морозоустойчивостью (Houde et al., 1992; Vítámvás et al., 2007).

Кроме вышеуказанных подходов, в исследованиях по оценке морозоустойчивости у зерновых культур могут применяться методы по изучению различий в уровне основных фитогормонов. Например, на поздней стадии холодовой акклиматизации (7–42 дня) у холодоустойчивых злаков повышается содержание абсцизовой, жасмоновой и салициловой кислот, в то время как у холодочувствительных злаков происходит индукция ауксинов, цитокининов и гиббереллинов (Kosová et al., 2021). Одним из методов эффективной диагностики, который упрощает лабораторные методы оценки морозоустойчивости,

является проведение исследований лишь на зрелом зерне, без использования вегетирующих растений. В ряде работ были сделаны предположения о наличии взаимосвязи между морозостойкостью озимой пшеницы и содержанием катионов магния (Mg^{++}) в высокополимерной матричной/рибосомальной РНК (мРНК/рРНК), выделенной как из этиолированных проростков, так и из зрелого зерна озимой пшеницы. Сравнение двух сортов, различающихся по морозостойкости, позволило обнаружить явление дифференциального распада мРНК/рРНК *in vitro*. Данное явление отражало как генетические особенности растения, так и физиологическое состояние растения, вызванное условиями окружающей среды. Кроме того, наличие факта – сортоспецифического выпадения осадков гидрата окиси магния ($Mg(OH)_2$) в ходе исследования – побудило В. К. Плотникова с соавторами оценить содержание Mg^{++} в РНК озимой пшеницы. В результате было обнаружено, что содержание Mg^{++} варьирует в РНК в зависимости от генотипа и от условий окружающей среды. Детекция содержания Mg^{++} в РНК озимой пшеницы может быть использована как простейший подход, позволяющий количественно оценивать эффект взаимодействия «генотип – среда» (Plotnikov et al., 2008). Кроме того, авторы предположили, что оценка морозоустойчивости может проводиться по степени гигроскопичности зрелого зерна (Plotnikov et al., 2014).

Таким образом, на настоящий момент, несмотря на множество используемых подходов, которые можно применить для оценки морозоустойчивости как в лабораторных, так и в полевых условиях, нет единого универсального и экономичного метода. В связи с этим существует трудность сопоставления результатов, полученных различными авторами, поскольку при оценке одного и того же сорта может выявиться разная морозоустойчивость. Поэтому для корректной оценки и отбора сортов по данному признаку нужно ориентироваться на комплексный подход, включающий анализ как молекулярно-генетических, так и физиолого-биохимических различий.

Полногеномный поиск ассоциаций (genome-wide association study, GWAS) является активно применяемым подходом при картировании QTLs хозяйственно важных признаков, эффективность которого доказана в исследованиях по выявлению новых локусов, а также локализации генов устойчивости к биотическим и абиотическим стрессорам (Akpınar et al., 2013; Aoun et al., 2021; Leonova, Ageeva, 2022; Afonnikova et al., 2024). На настоящий момент существует два основных методических подхода к картированию генов: анализ сцепления и анализ ассоциаций (Xu et al., 2017; Ibrahim et al., 2020; Joshi et al., 2023). GWAS эффективно используют для точного полногеномного картирования, а также для установления тесной ассоциации между маркируемым простым нуклеотидным полиморфизмом (single nucleotide polymorphism, SNP) и вариацией анализируемого признака (Joshi et al., 2023). В последние полтора десятка лет GWAS активно применяют для анализа генетической основы зимостойкости как признака (Visioni et al., 2013; Vaitkevičiūtė et al., 2023). Так, в работе B. Soleimani с соавторами были использованы 276 генотипов озимой пшеницы и проведено их фенотипирование в пяти географических пунктах в течение трех лет, что позволило идентифицировать 53 маркера на 23 QTLs, которые связанны с морозостойкостью. Данные QTLs были локализованы в 11 хромосомах (1A, 1B, 2A, 2B, 2D, 3A, 3D, 4A, 5A, 5B и 7D), для них идентифицированы 53 гена-кандидата. При этом максимальный вклад в развитие морозостойкости вносила хромосома 5A. Среди 53 генов-кандидатов было идентифицировано 16 генов, кодирующих bHLH-факторы транскрипции, расположенные в хромосомах 1B, 2A, 2B, 3A, 5A и 5B, а также 25 генов *CBF*, 15 из которых расположены в хромосоме 5A в локусе *FR-A2*, а 10 – в хромосоме 5B. В хромосоме 2A были идентифицированы гены *cold-responsive protein* (*WCOR15*: TraesCS2A01G427100.1; TraesCS2A01G427200.1), которые кодируют белок холодового шока WCOR15, и ген *cold shock domain protein 1* (TraesCS2A01G510000LC.1), ответственный за синтез белка 1 с доменом холодового шока. Кроме того, установлено, что продуктами трех генов *flowering locus T-like proteins* (TraesCS2A01G536600.1; TraesCS2A01G536700.1; TraesCS2A01G536900.1) являются флоригены, или FT-белки. В хромосоме 2B были идентифицированы гены: *RSL4* (*ROOT HAIR DEFECTIVE6-LIKE 4*; TraesCS2B01G212700.1) и *anthocyanin regulatory R-S protein-like* (TraesCS2B01G428000.1) (Soleimani et al., 2022). Наличие большого числа научных работ, посвященных изучению важных признаков у злаковых культур с применением GWAS, дает основание полагать, что данный подход, совместно с другими, более традиционными методами, в настоящее время, по-видимому, наиболее перспективный.

Заключение

Одна из главных задач селекции зерновых культур – повышение их устойчивости к внешним стрессовым воздействиям окружающей среды. Озимые культуры имеют преимущество перед яровыми. Наиболее актуальной является селекция озимых культур, устойчивых к морозу в регионах с холодным климатом. Данный обзор посвящен анализу научных данных, собранных преимущественно за последние 20 лет и раскрывающих механизмы реакции растений на воздействие холода на примере озимых злаковых культур. В работе описываются основные идентифицированные гены и кодируемые ими белки, а также QTL-локусы, контролирующие холодовую акклиматизацию. Однако до настоящего времени неясным остается механизм восприятия холодового сигнала растительной клеткой. Поскольку в полевых условиях на растения воздействует комплекс стрессовых факторов, в данном обзоре рассмотрены различные подходы для их оценки как в полевых, так и лабораторных условиях. В дополнение к часто используемым методам изучения морозоустойчивости также может быть применен полногеномный поиск ассоциаций.

References / Литература

Afonnikova S.D., Kiseleva A.A., Fedyaeva A.V., Komyshev E.G., Koval V.S., Afonnikov D.A. et al. Identification of novel loci precisely modulating pre-harvest sprouting resistance and red color components of the seed coat in *T. aestivum* L. *Plants (Basel)*. 2024;13(10):1309. DOI: 10.3390/plants13101309

Akhtar M., Jaiswal A., Taj G., Jaiswal J.P., Qureshi M.I., Singh N.K. DREB1/CBF transcription factors: their structure, function and role in abiotic stress tolerance in plants. *Journal of Genetics*. 2012;91(3):385-395. DOI: 10.1007/s12041-012-0201-3

Akpınar B.A., Lucas S.J., Budak H. Genomics approaches for crop improvement against abiotic stress. *The Scientific World Journal*. 2013;2013:361921. DOI: 10.1155/2013/361921

Aoun M., Rouse M.N., Kolmer J.A., Kumar A., Elias E.M. Genome-wide association studies reveal all-stage rust resistance loci in elite durum wheat genotypes. *Frontiers in Plant Science*. 2021;12:640739. DOI: 10.3389/fpls.2021.640739

Armonienė R., Liatukas Ž., Brazauskas G. Evaluation of freezing tolerance of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) under controlled conditions and in the field. *Zemdirbyste – Agriculture*. 2013;100:417-424. DOI: 10.13080/z-a.2013.100.053

Badawi M., Danyluk J., Boucho B., Houde M., Sarhan F. The CBF gene family in hexaploid wheat and its relationship to the phylogenetic complexity of cereal CBFs. *Molecular Genetics and Genomics*. 2007;277(5):533-554. DOI: 10.1007/s00438-006-0206-9

Badawi M., Reddy Y.V., Agharbaoui Z., Tominaga Y., Danyluk J., Sarhan F. et al. Structure and functional analysis of wheat ICE (inducer of CBF expression) genes. *Plant and Cell Physiology*. 2008;49(8):1237-1249. DOI: 10.1093/pcp/pcn100

Bolouri P., Haliloğlu K., Mohammadi S.A., Türkoğlu A., İlhan E., Niedbała G. et al. Identification of novel QTLs associated with frost tolerance in winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plants (Basel)*. 2023;12(8):1641. DOI: 10.3390/plants12081641

Caccialupi G., Milc J., Caradonia F., Nasar M.F., Francia E. The *Triticeae* CBF gene cluster – To frost resistance and beyond. *Cells*. 2023;12(22):2606. DOI: 10.3390/cells12222606

Cha J.K., O'Connor K., Alahmad S., Lee J.H., Dinglasan E., Park H. et al. Speed vernalization to accelerate generation advance in winter cereal crops. *Molecular Plant*. 2022;15(8):1300-1309. DOI: 10.1016/j.molp.2022.06.012

Deryabin A., Zhukova K., Naraikina N., Venzhik Y. Effect of low temperature on content of primary metabolites in two wheat genotypes differing in cold tolerance. *Metabolites*. 2024;14(4):199. DOI: 10.3390/metabo14040199

Dhillon T., Pearce S.P., Stockinger E.J., Distelfeld A., Li C., Knox A.K. et al. Regulation of freezing tolerance and flowering in temperate cereals: the VRN-1 connection. *Plant Physiology*. 2010;153(4):1846-1858. DOI: 10.1104/pp.110.159079

Dorofeev N.V., Peshkova A.A., Voinikov V.K. Winter wheat in Irkutsk Province (Ozimaya pshenitsa v Irkutskoy oblasti). Irkutsk: Art-Press; 2004. [in Russian] (Дорофеев Н.В., Пешкова А.А., Войников В.К. Озимая пшеница в Иркутской области. Иркутск: Арт-Пресс; 2004).

Fowler D.B. Cold acclimation threshold induction temperatures in cereals. *Crop Science*. 2008;48(3):1147-1154. DOI: 10.2135/cropsci2007.10.0581

Fowler S.G., Cook D., Thomashow M.F. Low temperature induction of *Arabidopsis CBF1, 2*, and *3* is gated by the circadian clock. *Plant Physiology*. 2005;137(3):961-968. DOI: 10.1104/pp.104.058354

Frederiks T.M., Christopher J.T., Harvey G.L., Sutherland M.W., Borrell A.K. Current and emerging screening methods to identify post-head-emergence frost adaptation in wheat and barley. *Journal of Experimental Botany*. 2012;63(15):5405-5416. DOI: 10.1093/jxb/ers215

Gabor G., Stockinger E.J., Francia E., Milc J., Kocsy G., Pecchioni N. Freezing tolerance in the Triticeae. In: R.K. Varshney, R. Tuberosa (eds). *Translational Genomics for Crop Breeding: Abiotic Stress, Yield and Quality*. *Vol. 2*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons; 2013. p.99-124. DOI: 10.1002/9781118728482.ch7

Galiba G., Vágújfalvi A., Li C., Soltész A., Dubcovsky J. Regulatory genes involved in the determination of frost tolerance in temperate cereals. *Plant Science*. 2009;176(1):12-19. DOI: 10.1016/j.plantsci.2008.09.016

Ganeshan S., Vitamvas P., Fowler D.B., Chibbar R.N. Quantitative expression analysis of selected COR genes reveals their differential expression in leaf and crown tissues of wheat (*Triticum aestivum* L.) during an extended low temperature acclimation regimen. *Journal of Experimental Botany*. 2008;59(9):2393-2402. DOI: 10.1093/jxb/ern112

Guo J., Ren Y., Tang Z., Shi W., Zhou M. Characterization and expression profiling of the *ICE–CBF–COR* genes in wheat. *PeerJ*. 2019;7:e8190. DOI: 10.7717/peerj.8190

Heidarvand L., Maali Amiri R. What happens in plant molecular responses to cold stress? *Acta Physiologiae Plantarum*. 2010;32:419-431. DOI: 10.1007/s11738-009-0451-8

Houde M., Dhindsa R.S., Sarhan F. A molecular marker to select for freezing tolerance in Gramineae. *Molecular and General Genetics*. 1992;234(1):43-48. DOI: 10.1007/bf00272343

Ibrahim A.K., Zhang L., Niyitanga S., Afzal M.Z., Xu Y., Zhang L. et al. Principles and approaches of association mapping in plant breeding. *Tropical Plant Biology*. 2020;13(1):212-224. DOI: 10.1007/s12042-020-09261-4

International Wheat Genome Sequencing Consortium; Appels R., Eversole K., Stein N., Feuillet C., Keller B. et al.. Shifting the limits in wheat research and breeding using a fully annotated reference genome. *Science*. 2018;361(6403):eaar7191. DOI: 10.1126/science.aar7191

IWGSC. International Wheat Genome Sequencing Consortium: [website]. Available from: https://www.wheatgenome.org [accessed May 05, 2025].

Jin Y., Zhai S., Wang W., Ding X., Guo Z., Bai L. et al. Identification of genes from the ICE–CBF–COR pathway under cold stress in *Aegilops–Triticum* composite group and the evolution analysis with those from *Triticeae*. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 2018;24(2):211-229. DOI: 10.1007/s12298-017-0495-y

Joshi A., Yang S.Y., Song H.G., Min J., Lee J.H. Genetic databases and gene editing tools for enhancing crop resistance against abiotic stress. *Biology (Basel)*. 2023;12(11):1400. DOI: 10.3390/biology12111400

Kamata T., Uemura M. Solute accumulation in wheat seedlings during cold acclimation: contribution to increased freezing tolerance. *Cryo Letters*. 2004;25(5):311-322.

Korsukova A.V. Changes in cold and frost resistance of cereal seedlings under the influence of a tebuconazole-containing protectant seeds (Izmeneniye kholodo- i morozoustoychivosti prorostkov zlakov pod deystviyem tebukonazol-soderzhashchego protravitelya semyan) [dissertation]. Irkutsk; 2016. [in Russian] (Корсукова А.В. Изменение холодо- и морозоустойчивости проростков злаков под действием тебуконазол-содержащего протравителя семян: дис. … канд. биол. наук. Иркутск; 2016).

Kosová K., Klíma M., Prášil I.T., Vítámvás P. COR/LEA proteins as indicators of frost tolerance in Triticeae: A comparison of controlled versus field conditions. *Plants (Basel)*. 2021;10(4):789. DOI: 10.3390/plants10040789

Kosová K., Vitámvás P., Prášilová P., Prášil I.T. Accumulation of WCS120 and DHN5 proteins in differently frost-tolerant wheat and barley cultivars grown under a broad temperature scale. *Biologia Plantarum*. 2013;57(1):105-112. DOI: 10.1007/s10535-012-0237-5

Kovacs Z., Simon-Sarkadi L., Sovány C., Kirsch K., Galiba G., Kocsy G. Differential effects of cold acclimation and abscisic acid on free amino acid composition in wheat. *Plant Science*. 2011;180(1):61-68. DOI: 10.1016/j.plantsci.2010.08.010

Kume S., Kobayashi F., Ishibashi M., Ohno R., Nakamura C., Takumi S. Differential and coordinated expression of *Cbf* and *Cor/Lea* genes during long-term cold acclimation in two wheat cultivars showing distinct levels of freezing

tolerance. *Genes and Genetic Systems*. 2005;80(3):185-197. DOI: 10.1266/ggs.80.185

Leonova I.N., Ageeva E.V. Localization of the quantitative trait loci related to lodging resistance in spring bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2022;26(7):675-683. DOI: 10.18699/VJGB-22-82

Levy A.A., Feldman M. Evolution and origin of bread wheat. *The Plant Cell*. 2022;34(7):2549-2567. DOI: 10.1093/plcell/koac130

Lyusikov O.M., Gordej I.S., Shymko V.E., Matievskaja O.S., Gordej S.I., Satsuk I.V. Molecular-genetic aspects of winter wheat (*Tríticum* L.) resistance to low temperature stress. *Molecular and Applied Genetics*. 2022;33:137-150. [in Russian] (Люсиков О.М., Гордей И.С., Шимко В.Е., Матиевская О.С., Гордей С.И., Сацюк И.В. Молекулярно-генетические аспекты устойчивости озимой пшеницы (*Triticum* L.) к низкотемпературному стрессу. *Молекулярная и прикладная генетика*. 2022;33:137-150). DOI: 10.47612/1999-9127-2022-33-137-150

Michel S., Löschenberger F., Hellinger J., Strasser V., Ametz C., Pachler B. et al. Improving and maintaining winter hardiness and frost tolerance in bread wheat by genomic selection. *Frontiers in Plant Science*. 2019;10:1195. DOI: 10.3389/fpls.2019.01195

Mittler R. Abiotic stress, the field environment and stress combination. *Trends in Plant Science*. 2006;11(1):15-19. DOI: 10.1016/j.tplants.2005.11.002

Miura K., Furumoto T. Cold signaling and cold response in plants. *International Journal of Molecular Sciences*. 2013;14(3):5312-5337. DOI: 10.3390/ijms14035312

Ohno R., Takumi S., Nakamura C. Kinetics of transcript and protein accumulation of a low-molecular-weight wheat LEA D-11 dehydrin in response to low temperature. *Journal of Plant Physiology*. 2003;160(2):193-200. DOI: 10.1078/0176-1617-00925

Panasin V.I., Uyutov R.G., Vikhman M.I., Novikova S.I., Dolinina V.V. Experience of application of plant tissues electrical conductivity method for determination of viability of winter crops. *Agrochemical Herald*. 2017;(6):55-57. [in Russian] (Панасин В.И., Уютов Р.Г., Вихман М.И., Новикова С.И., Долинина В.В. Опыт применения метода электропроводности тканей для определения жизнеспособности озимых культур. *Агрохимический вестник*. 2017;(6):55-57).

Plotnikov V.K., Nasonov A.I., Ivanenko E.E., Kuzembaeva N.A., Bukreeva G.I., Kalenich V.I. Relationships between winter hardiness of winter bread wheat and magnesium cation content in RNA (Vzaimosvyaz morozostoykosti ozimoy myagkoy pshenitsy s soderzhaniyem kationov magniya v RNK). *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2008;(2):89-92. [in Russian] (Плотников В.К., Насонов А.И., Иваненко Е.Е., Кузембаева Н.А., Букреева Г.И., Каленич В.И. Взаимосвязь морозостойкости озимой мягкой пшеницы с содержанием катионов магния в РНК. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2008;(2):89-92).

Plotnikov V.K., Yevtushenko Y.Y., Salfetnikov A.A., Repko N.V., Nasonov A.I. Biological markers for selection on the frost resistance of winter wheat and barley form. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2014;104(10):1855-1887. [in Russian] (Плотников В.К., Евтушенко Я.Ю., Салфетников А.А., Репко Н.В., Насонов А.И. Биологические маркеры для селекции на морозоустойчивость озимых форм мягкой пшеницы и ячменя. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2014;104(10):1855-1887). URL: https://ej.kubagro.ru/2014/10/pdf/128.pdf [дата обращения: 05.05.2025].

Pomortsev A.V., Dorofeev N.V., Katysheva N.B., Peshkova A.A. Changes in dehydrin composition in winter cereal crowns during winter survival. *Biologia Plantarum*. 2017;61(2):394-398. DOI: 10.1007/s10535-016-0673-8

Sandve S.R., Kosmala A., Rudi H., Fjellheim S., Rapacz M., Yamada T. et al. Molecular mechanisms underlying frost tolerance in perennial grasses adapted to cold climates. *Plant Science*. 2011;180(1):69-77. DOI: 10.1016/j.plantsci.2010.07.011

Shi Y., Ding Y., Yang S. Cold signal transduction and its interplay with phytohormones during cold acclimation. *Plant and Cell Physiology*. 2015;56(1):7-15. DOI: 10.1093/pcp/pcu115

Shimamura C., Ohno R., Nakamura C., Takumi S. Improvement of freezing tolerance in tobacco plants expressing a cold-responsive and chloroplast-targeting protein WCOR15 of wheat. *Journal of Plant Physiology*. 2006;163(2):213-219. DOI: 10.1016/j.jplph.2005.06.008

Sieber A.N., Longin C.F.H., Leiser W.L., Würschum T. Copy number variation of *CBF-A14* at the *Fr-A2* locus determines frost tolerance in winter durum wheat. *Theoretical and Applied Genetics*. 2016;129(6):1087-1097. DOI: 10.1007/s00122-016-2685-3

Soleimani B., Lehnert H., Babben S., Keilwagen J., Koch M., Arana-Ceballos F.A. et al. Genome wide association study of frost tolerance in wheat. *Scientific Reports*. 2022;12(1):5275. DOI: 10.1038/s41598-022-08706-y

Song L., Wang R., Yang X., Zhang A., Liu D. Molecular markers and their applications in marker-assisted selection (MAS) in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agriculture*. 2023;13(3):642. DOI: 10.3390/agriculture13030642

Takumi S., Shimamura C., Kobayashi F. Increased freezing tolerance through up-regulation of downstream genes via the wheat CBF gene in transgenic tobacco. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2008;46(2):205-211. DOI: 10.1016/j.plaphy.2007.10.019

Todorovska E.G., Kolev S., Christov N.K., Balint A., Kocsy G., Vágújfalvi A. et al. The expression of *CBF* genes at *Fr-2* locus is associated with the level of frost tolerance in Bulgarian winter wheat cultivars. *Biotechnology, Biotechnological Equipment*. 2014;28(3):392-401. DOI: 10.1080/13102818.2014.944401

Trunova T.I. Plant and low-temperature stress. 64th Timiryazev reading (Rasteniya i nizkotemperaturny stress. 64-e Timiryazevskoye chteniye) Moscow: Nauka; 2007. [in Russian] (Трунова Т.И. Растение и низкотемпературный стресс. 64-е Тимирязевское чтение. Москва: Наука; 2007).

Vagujfalvi A., Aprile A., Miller A., Dubcovsky J., Delugu G., Galiba G. et al. The expression of several *Cbf* genes at the *Fr-A2* locus is linked to frost resistance in wheat. *Molecular Genetics and Genomics*. 2005;274(5):506-514. DOI: 10.1007/s00438-005-0047-y

Vagujfalvi A., Galiba G., Cattivelli L., Dubcovsky J. The cold regulated transcriptional activator *Cbf3*is linked to the frost-tolerance gene *Fr-A2* on wheat chromosome 5A. *Molecular Genetics and Genomics*. 2003;269(1):60-67. DOI: 10.1007/s00438-003-0806-6

Vaitkevičiūtė G., Chawade A., Lillemo M., Liatukas Ž., Aleliūnas A., Armonienė R. Genome-wide association analysis of freezing tolerance and winter hardiness in winter wheat of Nordic origin. *Plants (Basel)*. 2023;12(23):4014. DOI: 10.3390/plants12234014

Visioni A., Tondelli A., Francia E., Pswarayi A., Malosetti M., Russell J. et al. Genome-wide association mapping of frost tolerance in barley (*Hordeum vulgare* L.). *BMC Genomics*. 2013;14:424. DOI: 10.1186/1471-2164-14-424

Vítámvás P., Kosová K., Prášilová P., Prášil I.T. Accumulation of WCS120 protein in wheat cultivars grown at 9°C or 17°C in relation to their winter survival. *Plant Breeding*. 2010;129(6):611-616. DOI: 10.1111/j.1439-0523.2010.01783.x

Vítámvás P., Saalbach G., Prášil I.T., Capková V., Opatrná J., Ahmed J. WCS120 protein family and proteins soluble upon boiling in cold-acclimated winter wheat. *Journal of Plant Physiology*. 2007;164(9):1197-1207. DOI: 10.1016/j.jplph.2006.06.011

Würschum T., Longin H.F.C., Hahn V., Tucker M.R., Leiser W.L. Copy number variations of *CBF* genes at the *Fr-A2* locus are essential components of winter hardiness in wheat. *The Plant Journal*. 2017;89(4):764-773. DOI: 10.1111/tpj.13424

Xu Y., Li P., Yang Z., Xu C. Genetic mapping of quantitative trait loci in crops. *The Crop Journal*. 2017;5(2):175-184. DOI: 10.1016/j.cj.2016.06.003

Zhu J., Pearce S., Burke A., See D.R., Skinner D.Z., Dubcovsky J. et al. Copy number and haplotype variation at the *VRN-A1* and central *FR-A2* loci are associated with frost tolerance in hexaploid wheat. *Theoretical and Applied Genetics*. 2014;127(5):1183-1197. DOI: 10.1007/s00122-014-2290-2

Информация об авторе

Анна Валерьевна Федяева, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 10, fedyaeva.anna@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0637-6899

Information about the author

Anna V. Fedyaeva, Cand. Sci. (Biology), Researcher, Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10 Akademika Lavrentyeva Ave., Novosibirsk 630090, Russia, fedyaeva.anna@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0637-6899

Статья поступила в редакцию 15.07.2025; одобрена после рецензирования 02.02.2026; принята к публикации 08.04.2026.
The article was submitted on 15.07.2025; approved after reviewing on 02.02.2026; accepted for publication on 08.04.2026.

ИСТОРИЯ АГРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ВИР. СЛАВНЫЕ ИМЕНА
HISTORY OF AGROBIOLOGICAL RESEARCH AND VIR. NAMES OF RENOWN

Юбилейные сборники ВИР 2025 года / 2025 anniversary publications by VIR

100 лет отделу генетических ресурсов плодовых культур ВИР: материалы научного семинара, Санкт-Петербург, 10 декабря 2025 г.: научное электронное издание / под общей редакцией Е. К. Хлесткиной ; ответственные редакторы: Ю. В. Ухатова, Н. Г. Тихонова; Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова. – Санкт-Петербург : ВИР, 2025. – 49 с. : табл., ил. – ISBN 978-5-907780-32-3. – DOI: 10.30901/978-5-907780-32-3

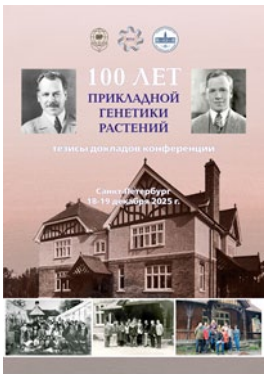
100 Years of the VIR Fruit Crop Genetic Resources Department : Proceedings of the Scientific Workshop, St. Petersburg, December 10, 2025 : scientific online edition / E. K. Khlestkina (chief ed.) ; Yu. V. Ukhatova, N. G. Tikhonova (eds) ; N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources. – St. Petersburg : VIR, 2025. – 49 p. : tab., ill. – ISBN 978-5-907780-32-3. – DOI: 10.30901/978-5-907780-32-3

Web-сайт Семинара: https://www.vir.nw.ru/blog/2025/11/10/gen-resurs-plodovyh-kultur-100/

100 лет отделу генетических ресурсов овощных и бахчевых культур ВИР: материалы научного семинара, Санкт-Петербург, 9 декабря 2025 г.: научное электронное издание / под общей редакцией Е. К. Хлесткиной ; ответственные редакторы: Ю. В. Ухатова, А. М. Артемьева ; Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова. – Санкт-Петербург : ВИР, 2025. – 79 с. : табл., ил. – ISBN 978-5-907780-31-6. – DOI: 10.30901/978-5-907780-31-6

100 Years of the VIR Vegetable and Cucurbit Crop Genetic Resources Department : Proceedings of the Scientific Workshop, St. Petersburg, December 9, 2025 : scientific online edition / E. K. Khlestkina (chief ed.) ; Yu. V. Ukhatova, A. M. Artemyeva (eds) ; N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources. – St. Petersburg : VIR, 2025. – 79 p. : tab., ill. – ISBN 978-5-907780-31-6. – DOI: 10.30901/978-5-907780-31-6

Web-сайт Семинара: https://www.vir.nw.ru/blog/2025/11/09/gen-resurs-ovoshhnyh-i-bahchevyh-kultur-100/



100 лет прикладной генетики растений : тезисы докладов конференции, Санкт-Петербург, 18–19 декабря 2025 г.: научное электронное издание / под общей редакцией Е. К. Хлесткиной ; ответственные редакторы: Е. Е. Радченко, И. Н. Анисимова ; Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова. – Санкт-Петербург : ВИР, 2025. – 57 с. : табл., ил. – ISBN 978-5-907780-27-9. – DOI: 10.30901/978-5-907780-27-9

100 Years of Applied Plant Genetics : Conference Abstracts, St. Petersburg, December 18–19, 2025 : scientific online edition / E. K. Khlestkina (chief ed.) ; E. E. Radchenko, I. N. Anisimova (eds) ; N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources. – St. Petersburg : VIR, 2025. – 57 p. : tab., ill. – ISBN 978-5-907780-27-9. – DOI: 10.30901/978-5-907780-27-9

Web-сайт Конференции: https://www.vir.nw.ru/blog/2025/11/05/genetika2025/

Всероссийская научно-практическая конференция «Потенциал генетических ресурсов растений в Республике Дагестан: вклад в продовольственную безопасность России» : материалы конференции, посвященной 90-летию Дагестанской опытной станции – филиала ВИР, г. Дербент, 28–29 апреля 2025 г. : научное электронное издание / под общей редакцией Ю. В. Ухатовой ; ответственный редактор К. У. Куркиев ; Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова. – Санкт-Петербург : ВИР, 2025. – 62 с. : табл., ил. – ISBN 978-5-907780-28-6. – DOI: 10.30901/978-5-907780-28-6

All-Russian Scientific and Practical Conference *Potential of Plant Genetic Resources in the Republic of Dagestan: Contribution to Food Security of Russia*: proceedings of the conference dedicated to the 90th anniversary of the Dagestan Experiment Station – branch of VIR, Derbent, April 28–29, 2025 : scientific online edition / Yu. V. Ukhatova (chief ed.) ; K. U. Kurkiev (ed.) ; N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources. – St. Petersburg : VIR, 2025. – 62 p. : tab., ill. – ISBN 978-5-907780-28-6. – DOI: 10.30901/978-5-907780-28-6

Web-сайт Конференции: https://www.vir.nw.ru/blog/2025/04/02/90-let-dosv/

**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 26.06.2026.
Дата выхода в свет 30.06.2026.
Формат 70×100$^{1}/_{8}$.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Печ. л. 31,75. Тираж 100 экз. Заказ № 389/2.

Подписной индекс 80333.
Журнал распространяется бесплатно и по подписке.

Издатель:
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр
Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова» (ВИР)

Адрес издателя:
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 42, 44

Отпечатано:
ООО «Р-ПРИНТ»
Адрес: 190121, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. Муниципальный округ Коломна,
пер. Дровяной, д. 5, литера А, помещ. 1-Н