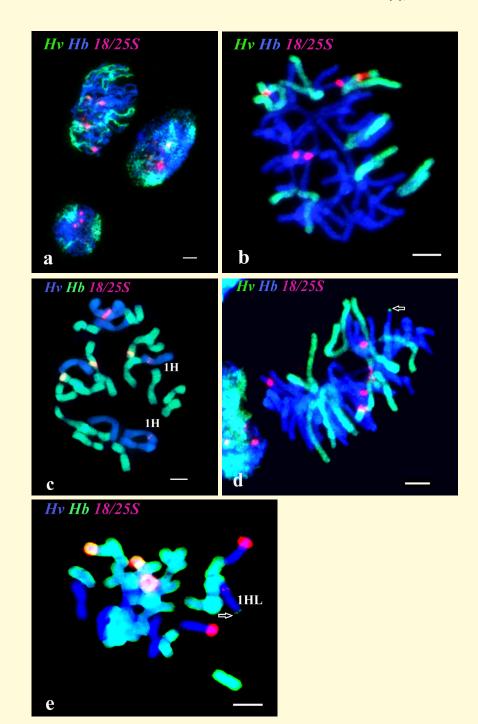
ISSN: 2658-6266 (Print) ISSN: 2658-6258 (Online)

БИОТЕХНОЛОГИЯ И СЕЛЕКЦИЯ РАСТЕНИЙ

7(1), 2024





МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ВСЕРОССИЙСКИЙ ИНСТИТУТ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ ИМЕНИ Н.И. ВАВИЛОВА (ВИР)



THE 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)

НАУЧНЫЙ РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ ЖУРНАЛ

БИОТЕХНОЛОГИЯ И СЕЛЕКЦИЯ РАСТЕНИЙ

2024, 7(1)

ОСНОВАН В 2018 ГОДУ ПЕРИОДИЧНОСТЬ 4 РАЗА В ГОД

Для биотехнологов, селекционеров, генетиков, преподавателей вузов биологического и сельскохозяйственного профиля.

e-mail: pbi@vir.nw.ru

190000 Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44

© Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР)

DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1

УДК: 573.6:631.527

ПИ № ФС 77–74475 ISSN: 2658-6266 (Print) ISSN: 2658-6258 (Online)

На обложке:

Рисунок. Геномный состав зародышей, полученных в результате скрещивания тетраплоидного гибрида (Hordeum bulbosum L. (4x) × Hordeum vulgare L. (4x)) с H. bulbosum (4x)

Материалы к статье: Пендинен Г.И., Чернов В.Е., Шольц М. Возможности использования тетраплоидного межвидового гибрида *Hordeum bulbosum* L. × *Hordeum vulgare* L. в получении новых рекомбинантных линий ячменя.

SCIENTIFIC PEER REVIEWED JOURNAL

PLANT BIOTECHNOLOGY AND BREEDING

2024, 7(1)

FOUNDED IN 2018
PUBLISHED 4 TIMES ANNUALLY

Addressed to biotechnologists, geneticists, plant breeders and lecturers of biological and agricultural universities and colleges.

e-mail: pbi@vir.nw.ru

42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia

© Federal Research Center the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR)

Cover photo:

Figure. Genome composition of embryos obtained in crosses of the tetraploid hybrid (Hordeum bulbosum L. (4x) × Hordeum vulgare L. (4x)) with H. bulbosum (4x)

Materials for the article: Pendinen G.I., Chernov V.E., Scholz M. Possibilities of using the tetraploid interspecific hybrid *Hordeum bulbosum* L. × *Hordeum vulgare* L. in obtaining new recombinant barley lines.

Биотехнология и селекция растений

2024 **Tom 7** Nº 1

DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1 https://biosel.elpub.ru

Научный рецензируемый журнал Издается с 2018 г.

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации СМИ: ПИ № ФС 77 - 74475 от 30.11.2018

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение

«Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова»

Главный редактор:

Е. К. Хлесткина – д.б.н., профессор РАН (Россия)

Заместители главного редактора:

Т. А. Гавриленко – д.б.н. (Россия)

И. Н. Анисимова – д.б.н. (Россия)

Л. Ю. Новикова – д.с.-х.н. (Россия)

Ответственный секретарь:

Н. А. Оськина

Редакционный совет:

О. С. Афанасенко – д.б.н., академик РАН (Россия) Г. А. Баталова – д.с.-х.н., академик РАН (Россия)

Р. К. Берсимбаев – д.б.н., академик НАН РК (Казахстан)

Л. А. Беспалова – д.с.-х.н., академик РАН (Россия)

А. И. Грабовец – д.с.-х.н., чл.-корр. РАН (Россия) С. И. Гриб – д.с.-х.н., академик НАНБ (Беларусь) Е. А. Егоров – д.э.н., академик РАН (Россия) В. Г. Еремин – д.с.-х.н., профессор РАН (Россия) Г. В. Еремин – д.с.-х.н., академик РАН (Россия)

Г. И. Карлов – д.б.н., чл.-корр. РАН (Россия)

А. В. Кильчевский – д.б.н., академик НАНБ (Беларусь) Н. А. Колчанов – д.б.н., академик РАН (Россия)

В. Н. Корзун — д-р (Германия) А. В. Кочетов — д.б.н., чл.-корр. РАН (Россия) Н. В. Кухарчик — д.с.-х.н. (Беларусь) В. М. Лукомец — д.с.-х.н., академик РАН (Россия) Л. А. Лутова — д.б.н. (Россия)

С. Мишева – д-р (Болгария)

А. И. Моргунов – д-р (Турция) В. Ройчев – д.с.-х.н. (Болгария) А. А. Романенко – д.с.-х.н., академик РАН (Россия) А. В. Рындин – д.с.-х.н., академик РАН (Россия)

Е. Н. Седов – д.с.-х.н., академик РАН (Россия) И. А. Тихонович – д.б.н., академик РАН (Россия)

П. Н. Харченко – д.б.н., академик РАН (Россия) Л. В. Хотылева – д.б.н., академик НАНБ (Беларусь) В. К. Шумный – д.б.н., академик РАН (Россия)

Редакционная коллегия:

Е. Е. Андронов – к.б.н. (Россия)

Д. А. Афонников – к.б.н. (Россия)

А. Х. Баймиев – д.б.н. (Россия)

И. А. Белан – к.с.-х.н. (Россия)

А. Г. Беседин – к.с.-х.н. (Россия) М. А. Вишнякова – д.б.н. (Россия)

В. А. Гаврилова – д.б.н. (Россия)

С. В. Гаркуша – д.с.-х.н. (Россия) Т. А. Гасанова – к.с.-х.н. (Россия)

С. В. Герасимова – к.б.н. (Россия) М. С. Гинс – д.б.н., чл.-корр. РАН (Россия) С. В. Гончаров – д.б.н. (Россия) Р. О. Давоян – д.б.н. (Россия) Я. Н. Демурин – д.б.н. (Россия) М. Г. Дивашук – к.б.н. (Россия)

С. Н. Еланский – д.б.н. (Россия)

С. Н. ЕЛАНСКИИ — Д.О.Н. (РОССИЯ)
О. В. Еремина — Д.С.-х.н. (РОССИЯ)
А. П. Ермишин — Д.б.н. (Беларусь)
М. В. Ефимова — к.б.н. (РОССИЯ)
Р. Ш. Заремук — Д.С.-х.н. (РОССИЯ)
С. В. Зеленцов — Д.С.-х.н., Чл.-корр. РАН (РОССИЯ)
Е. Т. Ильницкая — к.б.н. (РОССИЯ)

Р. Н. Календарь — к.б.н. (Казахстан) Н. Н. Карпун — д.б.н. (Россия) В. С. Ковалев — д.с.-х.н. (Россия)

Н. Н. Коваленко – д.б.н. (Россия) Е. З. Кочиева – д.б.н. (Россия)

Б. Р. Кулуев – д.б.н. (Россия)

К. У. Куркиев – д.б.н. (Россия)

К. Э. Куринаренко – к.б.н. (Казахстан) И. Н. Леонова – д.б.н. (Россия) И. Е. Лихенко – д.с.-х.н. (Россия) В. В. Лиховской – д.с.-х.н. (Россия) П. Н. Мальчиков – д.с.-х.н. (Россия)

Т. В. Матвеева – д.б.н. (Россия) Н. В. Мироненко – д.б.н. (Россия)

И. В. Митрофанова – д.б.н. (Россия) Е. И. Михайлова – д.б.н. (Россия) С. В. Осипова – д.б.н. (Россия)

В. Н. Подорожный – к.с.-х.н. (Россия)

Т. Г. Причко – д.с.-х.н. (Россия)

Т. А. Рожмина – д.б.н. (Россия)

А. В. Смыков – д.с.-х.н. (Россия)

А. А. СОловьев – д.б.н., профессор РАН (Россия) И. И. Супрун – к.б.н. (Россия) Е. К. Туруспеков – к.б.н. (Казахстан)

Е. В. Ульяновская — д.с.-х.н. (Россия)

О. Ю. Урбанович – д.б.н. (Беларусь)

Ю. В. Фотев – к.с.-х.н. (Россия) Э. Б. Хатефов – д.б.н. (Россия)

Я. А. Цепилов – к.б.н. (Россия)

М. Н. Шаптуренко – д.б.н. (Беларусь) О. Ю. Шоева – к.б.н. (Россия)

Л. А. Эльконин – д.б.н. (Россия) Г. В. Якуба – к.б.н. (Россия)

[©] Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 2024

Plant Biotechnology and Breeding

2024 Volume 7 No₁ DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1 https://biosel.elpub.ru

Scientific Peer Reviewed Journal

Founded in 2018

Founder: Federal Research Center the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources

Editor-in-Chief:

E. K. Khlestkina - Dr. Sci. in Biol., Professor. (Russia)

Deputy Editors-in-Chief:

T. A. Gavrilenko – Dr. Sci. in Biol. (Russia)

I. N. Anisimova - Dr. Sci. in Biol. (Russia)

L. Yu. Novikova - Dr. Sci. in Agricul. (Russia)

Executive Secretary:

N. A. Oskina

Editorial council:

O. S. Afanasenko – Dr. Sci. in Biol., Full Member of the RAS (Russia)

G. A. Batalova – Dr. Sci. in Agricul., Full Member of the RAS (Russia) R. K. Bersimbaev – Dr. Sci. in Biol., Full Member of the NAS RK (Kazakhstan)

L. A. Bespalova – Dr. Sci. in Agricul., Full Member of the RAS (Russia)

E. A. Egorov – Dr. Sci. in Econ., Full Member of the RAS (Russia)

G. V. Eremin – Dr. Sci. in Agricul., Full Member of the RAS (Russia) V. G. Eremin – Dr. Sci. in Agricul., Professor (Russia)

S. I. Grabovets – Dr. Sci. in Agricul., Corr. Member of the RAS (Russia)
S. I. Grib – Dr. Sci. in Agricul., Full Member of the NAS of Belarus (Belarus)
G. I. Karlov – Dr. Sci. in Biol., Corr. Member of the RAS (Russia)

P. N. Kharchenko – Dr. Sci. in Biol., Full Member of the RAS (Russia)

L. V. Khotyleva – Dr. Sci. in Biol., Full Member of the NAS of Belarus (Belarus)

A. V. Kilchevsky – Dr. Sci. in Biol., Corr. Member of the NAS of Belarus (Belarus) A. V. Kochetov – Dr. Sci. in Biol., Corr. Member of the RAS (Russia) N. A. Kolchanov – Dr. Sci. in Biol., Full Member of the RAS (Russia)

V. N. Korzun – Dr. (Germany)

N. V. Kukharchik – Dr. Sci. in Agricul. (Belarus)
V. M. Lukomets – Dr. Sci. in Agricul., Full Member of the RAS (Russia)

L. A. Lutova – Dr. Sci. in Biol. (Russia)

S. Misheva – Dr. (Bulgaria)

A. I. Morgunov - Dr. (Turkey)

A. A. Romanenko – Dr. Sci. in Agricul., Full Member of the RAS (Russia)
A. V. Ryndin – Dr. Sci. in Agricul., Full Member of the RAS (Russia)
V. Roychev – Dr. Sci. in Agricul. (Bulgaria)

E. N. Sedov – Dr. Sci. in Agricul., Full Member of the RAS (Russia)

V. K. Shumny – Dr. Sci. in Biol., Full Member of the RAS (Russia)

I. A. Tikhonovich – Dr. Sci. in Biol., Full Member of the RAS (Russia)

Editorial board:

D. A. Afonnikov – Cand. Sci. in Biol. (Russia) E. E. Andronov – Cand. Sci. in Biol. (Russia)

A. H. Bajmiev - Dr. Sci. in Biol. (Russia)

I. A. Belan - Cand. Sci. in Agricul. (Russia)

R. G. Besedin – Cand. Sci. in Agricul. (Russia) R. O. Davoyan – Dr. Sci. in Biol. (Russia) Ya. N. Demurin – Dr. Sci. in Biol. (Russia) M. G. Divashuk – Cand. Sci. in Biol. (Russia)

M. V. Efimova - Cand. Sci. in Biol. (Russia)

S. N. Elansky – Dr. Sci. in Biol. (Russia) L. A. Elkonin – Dr. Sci. in Biol. (Russia)

O. V. Eremina – Dr. Sci. in Agricul. (Russia) A. P. Ermishin – Dr. Sci. in Biol. (Belarus) Yu. V. Fotev – Cand. Sci. in Agricul. (Russia)

S. V. Garkusha – Dr. Sci. in Agricul. (Russia)

T. A. Gasanova – Cand. Sci. in Agricul. (Russia)

V. A. Gavrilova – Dr. Sci. in Biol. (Russia)

S. V. Gerasimova - Cand. Sci. in Biol. (Russia)

M. S. Gins – Dr. Sci. in Biol., Corr. Member of the RAS (Russia) S. V. Goncharov – Dr. Sci. in Biol. (Russia) E. T. Ilnitskaya – Cand. Sci. in Biol. (Russia)

R. N. Kalendar – Cand. Sci. in Biol. (Kazakhstan)

N. N. Karpun - Dr. Sci. in Biol. (Russia)

E. B. Khatefov - Dr. Sci. in Biol. (Russia)

E. Z. Kochieva - Dr. Sci. in Biol. (Russia)

V. S. Koulieva – Dr. Sci. in Biol. (Russia) V. S. Kovalenko – Dr. Sci. in Biol. (Russia) B. R. Kuluev – Dr. Sci. in Agricul. (Russia) K. U. Kurkiev – Dr. Sci. in Biol. (Russia)

S. V. Kushnarenko - Cand. Sci. in Biol. (Kazakhstan)

J. N. Leonova – Dr. Sci. in Biol. (Russia)
I. E. Lihenko – Dr. Sci. in Agricul. (Russia)
V. V. Likhovskoi – Dr. Sci. in Agricul. (Russia)
P. N. Malchikov – Dr. Sci. in Agricul. (Russia)
T. V. Matveeva – Dr. Sci. in Biol. (Russia)

N. V. Mironenko - Dr. Sci. in Biol. (Russia)

I. V. Mitrofanova - Dr. Sci. in Biol. (Russia)

E. I. Mikhailova - Dr. Sci. in Biol. (Russia)

S. V. Osipova – Dr. Sci. in Biol. (Russia) V. N. Podorozhniy – Cand. Sci. in Agricul. (Russia) T. G. Prichko – Dr. Sci. in Agricul. (Russia)

T. A. Rozhmina – Dr. Sci. in Biol. (Russia) M. N. Shapturenko – Dr. Sci. Biology (Belarus) O. Yu. Shoeva – Cand. Sci. in Biol. (Russia)

A. V. Smykov - Dr. Sci. in Agricul. (Russia)

A. A. Soloviev – Dr. Sci. in Biol., Professor (Russia) I. I. Suprun – Cand. Sci. in Biol. (Russia) Ya. A. Tsepilov – Cand. Sci. in Biol. (Russia)

E. K. Turuspekov - Cand. Sci. in Biol.

E. V. Ulyanovskaya – Dr. Sci. in Agricul. (Russia)

O. Yu. Urbanovich – Dr. Sci. in Biol. (Belarus)

M. A. Vishnyakova - Dr. Sci. in Biol. (Russia)

G. V. Yakuba — Cand. Sci. in Biol. (Russia) R. Sh. Zaremuk — Dr. Sci. in Agricul. (Russia)

S. V. Zelentsov - Dr. Sci. in Agricul., Full Member of the RAS (Russia)

© Federal Research Center

the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

	ОТ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА	٠
Е. К. Хлесткина		
вступительная ст	'ለጥL ወ	

РАЗВИТИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ СЕЛЕКЦИИ

Пендинен Г.И., Чернов В.Е., Шольц М.

Экспериментальная статья / Научная статья

Возможности использования тетраплоидного межвидового гибрида *Hordeum bulbosum* L. × *Hordeum vulgare* L. в получении новых рекомбинантных линий ячменя

МЕТОДЫ БИОТЕХНОЛОГИИ В СЕЛЕКЦИИ И СЕМЕНОВОДСТВЕ РАСТЕНИЙ

21

35

Ермишин А.П., Агеева А.С., Воронкова Е.В., Лукша В.И., Гукасян О.Н., Жарич В.М.

Научная статья

Использование андрогенеза in vitro для вовлечения в селекцию межвидовых гибридов Solanum tuberosum L. с диким аллотетраплоидным видом картофеля S. stoloniferum Schltdl. et Bouché

СОХРАНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ

Серафимович М.В., Ефимова М.В.

Обзорная статья

Эндемик Алтая Sibiraea altaiensis (Laxm.) Schneid.: возможное использование и способы сохранения

краткие сообщения 43

Короткова А.М., Кукоева Т.В., Тоцкий И.В., Григорьев Ю.Н., Шоева О.Ю.

Краткое сообщение

Апробация STS-маркера к гену *Nud1* для отбора голозерных гибридов ячменя

Куркиев К.У., Монахос С.Г., Хлесткина Е.К.

Краткое сообщение

К юбилею селекционера Григория Федоровича Монахоса

CONTENTS

FROM THE EDITOR IN CHIEF

21

E. K. Khlestkina INTRODUCTORY ARTICLE

DEVELOPMENT OF MODERN BREEDING METHODS

Pendinen G.I., Chernov V.E., Scholz M.

Original article

Possibilities of using the tetraploid interspecific hybrid *Hordeum bulbosum* L.× *Hordeum vulgare* L. in obtaining new recombinant barley lines

BIOTECHNOLOGY TECHNIQUES IN PLANT BREEDING AND SEED PRODUCTION

Yermishin A.P., Ageeva A.C., Voronkova E.V., Luksha V.I., Gukasian O.N., Zharich V.M.

Original article

The use of *in vitro* androgenesis for the involvement of interspecific hybrids between *Solanum tuberosum* L. and wild allotetraploid potato species *Solanum stoloniferum* Schltdl. et Bouché into breeding

CONSERVATION OF PLANT GENETIC RESOURCES USING BIOTECHNOLOGICAL APPROACHES

Serafimovich M.V., Efimova M.V.

Review article

The Altai endemic *Sibiraea altaiensis* (Laxm.) Schneid.: possible use and methods of conservation

BRIEF COMMUNICATIONS 43

Korotkova A.M, Kukoeva T.V., Totsky I.V., Grigoriev Yu.N., Shoeva O.Yu.

Brief communication

Testing of the STS-marker for the *Nud1* gene for the selection of naked barley hybrids

Kurkiev K.U., Monakhos S.G., Khlestkina E.K. 52

Brief communication

On the anniversary of the breeder Grigory Fedorovich Monakhos

52

СОДЕРЖАНИЕ

Нижников А.А., Хлесткина Е.К.

58

Краткое сообщение

К юбилею президента Вавиловского общества генетиков и селекционеров академика Игоря Анатольевича Тихоновича

Хлесткина Е.К., Кочетов А.В., Нижников А.А., Тихонович И.А.

65

Краткое сообщение

К юбилею почетного президента Вавиловского общества генетиков и селекционеров академика Владимира Константиновича Шумного

CONTENTS

Nizhnikov A.A., Khlestkina E.K.

58

Brief communication

On the anniversary of the President of Vavilov Society of Geneticists and Breeders Academician Igor Anatolyevich Tikhonovich

Khlestkina E.K., Kochetov A.V., Nizhnikov A.A., Tikhonovich I.A.

65

Brief communication

On the anniversary of the Honorary President of the Vavilov Society of Geneticists and Breeders Vladimir Konstantinovich Shumny



Уважаемые читатели!

Мы представляем в настоящем номере результаты исследований, которые могут быть интересны практикующим селекционерам, использующим в своих программах методы маркер-ориентированной селекции и отдаленной гибридизации.

В работе А.П. Ермишина с соавторами предложен биотехнологический подход для вовлечения в программы по селекции картофеля дикого аллотетраплоидного вида картофеля Solanum stoloniferum Schltdl. & Bouché — ценного источника генов устойчивости к болезням и вредителям. Показана возможность создания гибридов с комплексом признаков культурного картофеля, обладающих при этом высокой полевой устойчивостью к фитофторозу и являющихся носителями гена Rpi-stol высокой устойчивости к фитофторозу широкого спектра действия.

В работе Г.И. Пендинен с соавторами продемонстрированы возможности использования тетраплоидного межвидового гибрида $Hordeum\ bulbosum\ L.\ imes$ $Hordeum\ vulgare\ L.\ в$ получении новых рекомбинантных линий ячменя. Предложена эффективная схема скрещивания для получения интрогрессивных линий $H.\ vulgare$, несущих фрагменты генома ячменя луковичного — ценного источника устойчивости к мучнистой росе, стеблевой и листовой ржавчине, а также к вирусным заболеваниям.

В работе А.М. Коротковой с соавторами предложен новый способ маркер-контролируемого отбора для ускоренной селекции ячменя по признаку пленчатости/голозерности.

Отдельного внимания среди публикаций выпуска заслуживает обзор эффективных методов сохранения эндемичных видов, на примере алтайского эндемика *Sibiraea altaiensis* (Laxm.) Schneid., на основе биотехнологических подходов.

Дорогие друзья, редакция журнала поздравляет с юбилеями членов редакционного совета академиков РАН И.А. Тихоновича и В.К. Шумного – действующего президента Вавиловского общества и его предшественника – почетного президента общества. Слова поздравлений адресуем и ведущему селекционеру в области овощных культур – Г.Ф. Монахосу. На страницах выпуска представлены сообщения, посвященные деятельности этих ярких ученых и организаторов науки. Желаем юбилярам долгих и плодотворных лет в науке на благо нашей страны!

Главный редактор, профессор РАН Е.К. Хлесткина Научная статья УДК 575.222.72:633.16

DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1-02



Возможности использования тетраплоидного межвидового гибрида Hordeum bulbosum L. × Hordeum vulgare L. в получении новых рекомбинантных линий ячменя

Г. И. Пендинен¹, В. Е. Чернов², М Шольц³

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

Автор, ответственный за переписку: Галина Ивановна Пендинен, pendinen@mail.ru

Актуальность. Hordeum bulbosum L. - единственный дикорастущий вид рода Hordeum, генофонд которого успешно используется в интрогрессивной гибридизации для расширения генетического разнообразия Hordeum vulgare L. При создании интрогрессивных форм на основе гибридов H. vulgare с H. bulbosum необходимо учитывать плоидность образцов родительских видов, их генетические особенности, определяющие интенсивность процесса элиминации хромосом *H. bulbosum* в эмбриогенезе. Цель исследования – выявление особенностей, связанных с элиминацией хромосом ячменя луковичного в зародышах, полученных в различных комбинациях скрещиваний с участием тетраплоидного гибрида H. bulbosum с H. vulgare для его эффективного использования при создании интрогрессивных линий ячменя H. vulgare. Материал и методы. Для анализа использовали 9-15-ти дневные зародыши, полученные в скрещиваниях тетраплоидного гибрида F, (H. bulbosum A17 (4x) × H. vulgare Borwina (4x)) (HbHbHvHv) с сортами H. vulgare 'Igri' (2x) и 'Borwina' (2x), с H. bulbosum A17 (4x), а также при самоопылении гибрида. Анализ хромосомного состава проводили на давленых препаратах разновозрастных зародышей методом геномной in situ гибридизации (GISH). Результаты. При самоопылении гибрида среди 11-15-ти дневных зародышей из числа изученных примерно половина – миксоплоидные, у остальных преобладают клетки, содержащие только геномный материал *H. vulgare*. При скрещивании гибрида с сортами ячменя 'Igri' (2x) и 'Borwina' (2x) процесс элиминации интенсивен, к 10-11-му дням после опыления во всех зародышах преобладают клетки, содержащие только геномный материал H. vulgare независимо от направления скрещивания и используемого сорта. В скрещиваниях тетраплоидного гибрида с H. bulbosum A17 (4x) получаются гибридные зародыши со стабильным хромосомным составом. Во всех вариантах скрещиваний выявлены зародыши с рекомбинантными хромосомами H. vulgare, несущие чужеродный генетический материал ячменя луковичного. Заключение. Для массового получения интрогрессивных линий культурного ячменя различных сортов на основе частично фертильного гибрида F, (H. bulbosum A17 (4x) × H. vulgare 'Borwina' (4x)) (HbHbHvHv) наиболее эффективным является скрещивание с сортами H. vulgare (2x). В потомстве от таких скрещиваний будут только растения культурного ячменя, среди которых можно выявить формы с интрогрессией H. bulbosum и уже в первом поколении от их самоопыления отобрать линии H. vulgare, несущие генетический материал ячменя луковичного в обоих гомологах.

Ключевые слова: межвидовая гибридизация, элиминация хромосом, чужеродная интрогрессия, интрогрессивные линии

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту № FGEM-2022-0009, а также в рамках двустороннего российско-германского сотрудничества (проект №145)

Для цитирования: Пендинен Г.И., Чернов В.Е., Шольц М. Возможности использования тетраплоидного межвидового гибрида Hordeum bulbosum L. × Hordeum vulgare L. в получении новых рекомбинантных линий ячменя. Биотехнология и селекция растений. 2024;7(1):6-20. DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1-o2

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

© Пендинен Г.И., Чернов В.Е., Шольц М., 2024

²Агрофизический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

³Julius Kühn-Institut Federal Research Centre for Cultivated Plants, Institute for Breeding Research on Agricultural Crops (Zl), Groß Lüsewitz, Germany

Original article

DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1-o2

Possibilities of using the tetraploid interspecific hybrid *Hordeum* bulbosum L.× *Hordeum vulgare* L. in obtaining new recombinant barley lines

Galina I. Pendinen¹, Vladimir E. Chernov², Margaret Scholz³

¹N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), St. Petersburg, Russia

Corresponding author: Galina I. Pendinen, pendinen@mail.ru

Background. Hordeum bulbosum L. is the only wild species of the genus Hordeum, the gene pool of which is successfully used in introgressive hybridization to increase the genetic diversity of H. vulgare L. When creating introgression forms based on hybrids of H. vulgare with H. bulbosum, it is necessary to take into consideration the ploidy of the parent species, and their genetic features that determine the intensity of the process of H. bulbosum chromosomes elimination in embryogenesis. The purpose of our investigation was to study the features associated with the elimination of bulbous barley chromosomes in embryos obtained in various combinations of crosses involving the tetraploid hybrid H. bulbosum with H. vulgare for its effective use in obtaining introgression lines of H. vulgare. Material and methods. The analysis was performed on 9-15 days old embryos obtained in crosses of the tetraploid hybrid F2 (H. bulbosum A17 (4x) × H. vulgare 'Borwina' (4x)) (HbHbHvHv) with 'Igri' (2x) and 'Borwina' (2x) barley varieties, with H. bulbosum A17 (4x), as well as during its self-pollination. The chromosomal composition of embryos of different ages was analyzed on squashed embryo slides using genomic in situ hybridization (GISH). Results. Among the 11-15 days old embryos obtained from self-pollination of the hybrid, approximately half of the studied ones were mixoploids, while in other embryos the majority of cells contained only the genomic material of H. vulgare. The elimination process was very intensive in crosses of the hybrid with the barley varieties 'Igri' (2x) and 'Borwina' (2x), and by day 10-11 after pollination cells containing only the genomic material of H. vulgare predominated in all embryos, regardless of the direction of crossing and the variety used. Hybrid embryos with a stable chromosomal composition resulted from a cross of a tetraploid hybrid with H. bulbosum A17 (4x). Embryos with recombinant H. vulgare chromosomes carrying alien genetic material of bulbous barley were identified in all types of crosses. Conclusion. The most efficient way for the mass production of introgression lines of cultivated barley varieties based on the partially fertile hybrid F2 (H. bulbosum A17 (4x) × H. vulgare 'Borwina' (4x)), is the crossing with varieties of H. vulgare (2x). The progeny from such crosses will contain only cultivated barley plants, among which it is possible to identify forms with the introgression of H. bulbosum and use already the first generation from their selfpollination for selecting *H. vulgare* lines carrying the genetic material of bulbous barley in both homologs.

Keywords: interspecific hybridization, chromosomes elimination, alien introgression, introgression lines

Acknowledgments: the research was performed within the framework of the State Assignment according to the Thematic Plan of VIR, Project No. FGEM-2022-0009 as well as within the framework of bilateral Russian-German cooperation (project No.145)

For citation: Pendinen G.I., Chernov V.E., Scholz M. Possibilities of using the tetraploid interspecific hybrid Hordeum bulbosum L. × Hordeum vulgare L. in obtaining new recombinant barley lines. Plant Biotechnology and Breeding. 2024;7(1):6-20. (In Russ.). DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1-o2

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

© Pendinen G.I., Chernov V.E., Scholz M., 2024

²Agrophysical Research Institute, St. Petersburg, Russia

³Julius Kühn-Institut Federal Research Centre for Cultivated Plants, Institute for Breeding Research on Agricultural Crops (Zl), Groß Lüsewitz, Germany

Введение

Ячмень луковичный *Hordeum bulbosum* L. – многолетний вид, среди образцов которого встречаются диплоидные и тетраплоидные формы (Bothmer et al., 1991). Как и культурный ячмень, он относится к секции *Hordeum*. Для геномов этих двух видов характерна значительная степень сходства, обеспечивающая гомеологичную рекомбинацию в мейозе (Bothmer et al., 1991), а также высокая степень коллинеарности всех групп сцепления (Wendler et al., 2017). Ячмень луковичный – единственный дикорастущий вид рода *Hordeum*, генофонд которого успешно используется в интрогрессивной гибридизации для расширения генетического разнообразия ячменя культурного *Hordeum vulgare* L.

Образцы *H. bulbosum* характеризуются рядом ценных признаков, таких как устойчивость к мучнистой росе, стеблевой и листовой ржавчине, вирусам BaMMV, BaYMV и BYDV (Jones, Pickering, 1978; Michel, 1996; Навекив et al. 2004). Показана возможность их переноса от образцов *H. bulbosum* в геном *H. vulgare* при межвидовой гибридизации (Jones, Pickering, 1978; Michel, 1996; Ruge et al., 2003; Ruge-Wehling et al., 2006; Scholz et al., 2009; Hoseinzadeh et al, 2020; Pidon et al., 2021; 2023; Yu et al., 2018; 2022). На основе межвидовых гибридов между *H. vulgare* и *H. bulbosum* получены серии интрогрессивных линий (Johnston et al., 2009; Pickering, 1991; Pickering et al. 1994; Pickering et al., 2000; Zhang et al., 2001; Scholz et al., 2009; Pendinen et al., 2018).

При скрещивании H. vulgare с H. bulbosum в потомстве могут наблюдаться межвидовые гибриды, или гаплоиды культурного ячменя как результат элиминации хромосом ячменя луковичного в процессе эмбриогенеза (Lange, 1971a; b; Kasha, Kao, 1970). В скрещиваниях H. vulgare (2x) с H.bulbosum (2x) и H. vulgare (4x) и H. bulbosum (4x) при соотношении геномов 1Hv: 1Hb в гибридном зародыше часто наблюдается элиминация хромосом ячменя луковичного, и результат скрещивания в значительной степени зависит от генотипов используемых родительских форм (Но, Kasha, 1975; Fukuyama, Hosoya, 1983; Devaux, 2003). Чаще всего в таких вариантах скрещиваний результатом являются гаплоиды или диплоидные формы *H. vulgare*, а также гибридные формы с нестабильным числом хромосом (Lange, 1971a; b). Эта особенность в значительной степени ограничивает вовлечение разнообразных сортов культурного ячменя в интрогрессивную гибридизацию с ячменем луковичным. В ряде комбинаций скрещиваний при соотношении плоидности родительских видов 1Hv: 1Hb с использованием сортов ячменя 'Emir' (2x) (Zhang et al., 1999; Pickering et al., 2004; 2006a) и 'Borwina' (4x) получены цитогенетически стабильные гибриды (Szigat, Pohler, 1982, Scholz, Pendinen, 2017). При соотношении геномов родительских видов 1Hv : 2Hb в скрещиваниях тетраплоидного H. bulbosum с диплоидным H. vulgare элиминации хромосом ячменя луковичного не происходит и в потомстве наблюдаются цитогенетически стабильные триплоидные гибриды (HvHbHb) независимо от используемых для создания гибридов образцов родительских видов (Lange, 1971a; Yu, 2018; Pendinen, Scholz, 2020).

Кроме того, в литературе описаны случаи получения триплоидных гибридов с геномным составом HvHvHb с нетипичным для гибридов культурного ячменя с ячменем луковичным соотношением дозы родительских геномов – 2Hv: 1Hb (Szigat, Pohler, 1982; Pickering, 1991; Gilpin et al., 1997). В этих случаях в получении гибридов использовали сорта 'Emir' и 'Borwina', полученных на основе *H. vulgare*.

При составлении схемы скрещиваний для получения интрогрессивных форм на основе гибридов культурного ячменя с ячменем луковичным необходимо учитывать ряд факторов, основными из которых являются плоидность образцов родительских видов, их генетические особенности, определяющие интенсивность процесса элиминации хромосом ячменя луковичного в эмбриогенезе. По результатам нашего предварительного исследования, интенсивность элиминации хромосом *Н. bulbosum* в эмбриогенезе гибридных зародышей, полученных при скрещивании ячменя луковичного (4x) с сортами ячменя культурного 'Igri' (4x) и 'Borwina' (4x) различается в зависимости от сорта ячменя (Pendinen et al., 2013).

Ранее в наших исследованиях был синтезирован тетраплоидный гибрид Hordeum bulbosum L. A17 (4x) × H. vulgare L. 'Borwina' (4x) (HbHbHvHv), в потомстве от его самоопыления получен частично фертильный тетраплоидный гибрид F, (НвНвНvНv), у которого детально изучены особенности гомеологичного спаривания хромосом в мейозе и реализация рекомбинационного потенциала в потомстве от самоопыления (Scholz, Pendinen, 2017). Родительский клон ячменя луковичного, использованный при его получении, характеризуется рядом ценных признаков, в частности, устойчивостью к Rhynchosporium secalis (Oudem.) Davis (Pickering et al., 2006b), к вирусам желтой карликовости ячменя BYDV, карликовости ячменя WDV, слабой мозаики ячменя BaMMV, желтой мозаики ячменя BaYM (Michel, 1996; Habekuß et al., 2004; Schliephake et al., 2013). При межвидовой гибридизации идентифицированный у H. bulbosum А17 ген Ryd4Hb устойчивости к BYDV был перенесен в субтерминальный участок хромосомы 3HL H. vulgare сорта 'Igri' (Scholz et al., 2009), ген Rph22 устойчивости к листовой ржавчине ячменя Puccinia hordei G.H.Otth в длинное плечо хромосомы 2HL сорта 'Golden Promise' (Johnston et al., 2013), ген количественной устойчивости Rph26, эффективный против листовой ржавчины ячменя Puccinia hordei, был интрогрессирован из этого же клона A17 H. bulbosum в субтерминальный участок хромосомы 1HL H. vulgare сорта 'Emir' (Yu et al, 2018). В связи с этим, актуальной задачей является получение серии интрогрессивных линий ячменя от гибридов, полученных от скрещивания различных сортов H. vulgare с клоном A17 H. bulbosum L.

Целью исследования являлось изучение особенностей, связанных с элиминацией хромосом ячменя луковичного в гибридных зародышах, полученных в различных комбинациях скрещиваний с участием частично фертильного гибрида $F_2(H.\ bulbosum\ A17\ (4x) \times H.\ vulgare$ 'Borwina' (4x)) для эффективного использования этого гибрида при создании на его основе интрогрессивных линий ячменя с участием различных сортов $H.\ vulgare$.

Материал и Методы

В работе использованы следующие образцы: клон ячменя луковичного H. bulbosum A17 (4x), тетраплоидные и диплоидные образцы H. vulgare copтов'Igri' (2x, 4x) и 'Borwina' (2x, 4x), многолетний тетраплоидный гибрид F, с геномным составом HbHbHvHv, полученный при самоопылении гибрида *H. bulbosum* A17 (4x) × H. vulgare 'Borwina' (4x) (Pendinen et al., 2013; Scholz, Pendinen, 2017). Для этого гибрида характерна частичная фертильность, в его потомстве от самоопыления встречаются как гибридные формы, так и диплоиды, соответствующие культурному ячменю (2х). И в первом, и во втором случае выявляются формы с рекомбинантными хромосомами культурного ячменя. Принимая во внимание особенности взаимодействия геномов родительских видов и перспективы дальнейшего использования этого гибрида в интрогрессивной гибридизации, изучали особенности поведения хромосом культурного ячменя и ячменя луковичного в эмбриогенезе у потомков от различных комбинаций скрещиваний: с сортами культурного ячменя 'Igri' (2x) и 'Borwina' (2x), с ячменем луковичным H. bulbosum A17 (4x), а также от самоопыления.

Для подтверждения наших предварительных данных о различном влиянии генотипов сортов 'Igri' и 'Borwina' на интенсивность элиминации хромосом изучали хромосомный состав зародышей из зафиксированных 10-ти, 12-ти и 14-ти дневных зерновок, полученных от скрещивания *H. bulbosum* A17 (4x) с сортом 'Igri' (4x) и 12-ти дневных зерновок, полученных от скрещивания с сортом 'Borwina' (4x). В делящихся клетках зародышей определяли число хромосом родительских видов. В каждом варианте изучали по три зародыша.

Подготовка материала для исследования. Растения выращивали в теплице с 16-ти часовым фотопериодом и температурой 22°С днем и 16°С ночью. Для скрещиваний цветки в колосьях материнских форм кастрировали за 2-3 дня до созревания пыльников. Опыление проводили через 2-3 дня после кастрации. Через 9-14 дней после опыления завязавшиеся зерновки помещали в фиксатор 3:1 (этиловый спирт 96%: ледяная уксусная кислота), фиксированный материал до использования хранили в морозильной камере при –20°С.

Зародыши из зафиксированных зерновок вычленяли непосредственно перед подготовкой препарата и помещали их на предметное стекло в каплю раствора маце-

рирующих ферментов, содержащих 4% целлюлазы R10 (1,14 U/mg) и 1% пектолиазы (0,94 U/mg) на 20-25 мин. Затем фермент убирали, зародыши промывали дистиллированной водой, затем 45% уксусной кислотой и использовали для приготовления давленых препаратов.

Флюоресцентная ДНК-ДНК гибридизация in situ. Для идентификации генетического материала ячменя луковичного использовали геномную in situ гибридизацию (GISH) с меченой геномной ДНК Н. bulbosum, в качестве блокирующей использовали ДНК H. vulgare 'Igri' (2x), кроме того, в некоторых случаях в пробу для гибридизации добавляли меченую 18/25S рДНК, маркирующую 1HS, 5HS, 6HS плечи хромосом культурного ячменя и плечо 6HS ячменя луковичного. Подготовку препаратов, мечение ДНК, флюоресцентную in situ гибридизацию проводили по ранее описанной методике (Scholz et al., 2009; Scholz, Pendinen, 2017). Геномную ДНК H. bulbosum и плазмидную ДНК, несущую 18S/25S рДНК (зонд Ver17) (Yakura, Tanifuji, 1983) метили методом Nick-трансляции с использованием DIG- или BIO-Nick Translation Mix (Roche Diagnostics).

Для анализа препаратов, создания и обработки изображений использовали эпифлюоресцентные микроскопы Nicon 90i (Nikon Corporation, Япония) с камерой DS-Qil и AxioImager M2 (Carl Zeiss microscopy GmbH, Germany) с камерой AxioCamMRm и программным обеспечением AxioVision Rel 4.8.

Результаты

Элиминация хромосом ячменя луковичного в гибридных зародышах от скрещивания H. bulbosum A17 (4x) с H. vulgare 'Igri' (4x) и 'Borwina' (4x)

Анализ 11-12-ти дневных зародышей, полученных в комбинации *H. bulbosum* A17 (4x) \times *H. vulgare* 'Igri' (4x) показал, что процесс элиминации хромосом ячменя луковичного очень интенсивный, наблюдаются микроядра, образованные хромосомами ячменя луковичного. Ни в одной из делящихся клеток не выявлено эуплоидного гибридного набора хромосом (14 Hb + 14 Hv). Выявленные анеуплоидные гибридные клетки имели от одной до 11-ти хромосом ячменя луковичного и 14 хромосом ячменя культурного. Значительная часть клеток представляли собой гаплоидные клетки тетраплоидного H. vulgare (n=2x=14) (рис. 1a, b). К 14-му дню в делящихся клетках не выявлено хромосом ячменя луковичного (рис. 1с). Хромосомный материал ячменя луковичного в зародышах этого возраста встречается только в виде редких микроядер.

В гибридных зародышах, полученных от скрещивания с сортом *H. vulgare* 'Borwina' (4x), процесс элиминации не столь интенсивен; к 12-му дню после опыления большинство клеток (92,6%) в проанализированных зародышах содержали полный набор хромосом *H. bulbosum*.

В ряде клеток (7,4%) отмечена элиминация от одной до четырех хромосом ячменя луковичного и выявлены

микроядра, образованные хромосомами H. bulbosum.

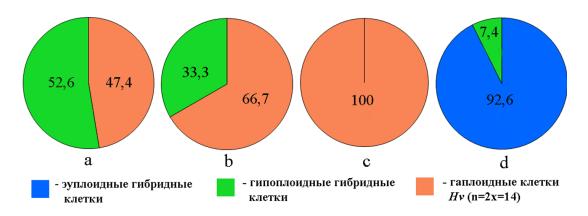


Рис. 1. Доли гаплоидных и гибридных (эуплоидных и гипоплоидных) клеток в зародышах, полученных от скрещиваниия *H. bulbosum* A17 (4x) с тетраплоидными образцами *H. vulgare* (4x) 'Igri' (a-c) и 'Borwina' (4x) (d)

а — 11-ти суточные зародыши; b — 12-ти суточные зародыши; c — 14-ти суточный зародыш; d — 12-ти суточные зародыши. Доля различных групп клеток на диаграмме указана в %

Fig. 1. Proportions of haploid and hybrid (euploid and hypoploid) cells in embryos obtained from crossing *H. bulbosum* A17 (4x) with tetraploid *H. vulgare* (4x) 'Igri' (a-c) and Borwina (4x) (d)

a – 11-day-old embryos; b – 12-day-old embryos; c – 14-day-old embryos, d – 12-day-old embryos. The occurrence of different groups of cells in the diagram is indicated in %

Хромосомный состав зародышей, полученных в различных комбинациях скрещиваний с участием тетраплоидного гибрида F_2 (*H. bulbosum* L. A17 (4x) × *H. vulgare* L. 'Borwina' (4x))

Тетраплоидный гибрид *H. bulbosum* A17 (4x) × *H. vulgare* 'Borwina' (4x), (HbHbHvHv) обладает частичной фертильностью; в его потомстве от самоопыления встречаются как гибридные формы, так и культурный ячмень (2x). И в первом, и во втором случае выявляются формы с рекомбинантными хромосомами культурного ячменя (Scholz, Pendinen, 2017). Принимая во внимание особенности взаимодействия геномов родительских видов, изучали особенности поведения хромосом культурного ячменя и ячменя луковичного в эмбриогенезе в различных комбинациях скрещиваний.

Самоопыление гибрида. Показано, что во всех изученных 9-ти-15-ти суточных зародышах, полученных при самоопылении гибрида, преобладает тенденция к элиминации хромосом ячменя луковичного (табл. 1). В тканях пяти изученных 9-ти и 11-ти суточных зародышей встречаются как клетки с полной элиминацией хромо-

сом ячменя луковичного, содержащие только хромосомы *H. vulgare*, так и клетки, в которых помимо хроматина культурного ячменя наблюдается остаточное количество генетического материала ячменя луковичного: от 1 до 5 хромосом (рис. 2a). Наблюдаются микроядра, образованные генетическим материалом ячменя луковичного, а также гибридные клетки (рис. 2b). В пяти из 11 проанализированных 13-ти – 15-ти суточных зародышей наблюдали практически полную элиминацию хромосом H. bulbosum, лишь в некоторых участках было отмечено наличие клеток, включающих наряду с хромосомами культурного ячменя остаточные количества хроматина ячменя луковичного, а также микроядра, образованные хроматином H. bulbosum. В шести зародышах наблюдалась миксоплоидия, клетки с 14 хромосомами культурного ячменя единичны; в основном, эти зародыши состоят из гибридных клеток с различным количеством генетического материала ячменя луковичного. Выявлены 11-ти, 13-ти и 15-ти дневные миксоплоидные гибридные зародыши. Цитогенетически стабильных гибридных зародышей, состоящих из клеток с геномным составом HvHvHbHb, выявлено не было.

Таблица 1. Характеристики геномного состава зародышей, полученных в результате самоопылении гибрида F_{2} (*H. bulbosum* L. A17 (4x) × *H. vulgare* L. 'Borwina' (4x)) (HbHbHvHv)

Table 1. Characteristics of the genomic composition of embryos obtained from self-pollination of the F, hybrid ($H.\ bulbosum\ L.\ A17\ (4x) \times H.\ vulgare\ L.$ 'Borwina' (4x)) (HbHbHvHv) hybrid

Возраст зародыша, сутки/ age of the embryo, days	Число зародышей/ Number of embryos	Характеристика геномного состава зародыша/ Characteristics of the genomic composition of the embryo	Наличие хромосом с интрогрессией/ Presence of chromosomes with introgression
9	1	Преобладают клетки, содержащие только геномный материал Hv^* (HvHv, 2n=14), некоторые содержат генетический материал Hv и Hb^{**} . Микроядра Hb	$1 - Hv^{Hb^{***}}$
	1	Миксоплоидный гибридный зародыш. Большинство клеток содержат генетический материал Hv и Hb , единичные - только 14 хромосом Hv .	0
11	1	Преобладают клетки, содержащие только геномный материал Hv . (HvHv, 2n=14), некоторые клетки содержат генетический материал Hv и Hb . Микроядра Hb .	$1 - Hv^{Hb*}$ $1 - 1HL$
	1	Преобладают клетки, содержащие только геномный материал Hv (HvHv, $2n=14$),. в некоторых клетках - единичные хромосомы Hb (не более 1 на клетку). Микроядра Hb .	1 – 1HL
13	2	Миксоплоидные гибридные зародыши: 14 хромосом Hv (HvHv, $2n=14$) и различное число (<14) хромосом Hb . Микроядра Hb .	0
13	2	Преобладают клетки, содержащие только геномный материал Hv (HvHv, 2n=14), некоторые содержат генетический материал Hv и Hb . Микроядра Hb .	0
	2	Преобладают клетки, содержащие только геномный материал <i>H.vulgare</i> (HvHv, 2n=14), некоторые клетки содержат генетический материал <i>Hv</i> и <i>Hb</i> .Микроядра <i>Hb</i> .	0
1		Преобладают клетки, содержащие только геномный материал Hv (HvHv, 2n=14), некоторые клетки содержат генетический материал Hv и Hb . Микроядра Hb .	$2-\mathrm{Hv}^{Hb^*}$
14 -15	1	Преобладают клетки, содержащие только геномный материал Hv (HvHv, 2n=14), некоторые клетки содержат генетический материал Hv и Hb . Микроядра Hb .	1 – 1HL 1 – 5HL/ 6HL 1 – Hv ^{Hb*}
	4	Миксоплоидные гибридные зародыши: 14 хромосом Hv (HvHv, 2n=14) и различное количество Hb . Часть зародыша – клетки, содержащие только хромосомы Hv (HvHv, 2n=14). Микроядра Hb .	0

^{*-}H. vulgare, **-H. $bulbosum, ***-Hv^{Hb}$ – неидентифицированная хромосома H. vulgare с интрогрессией H. bulbosum (нe1H, нe 5H, нe 6H)

В клетках у пяти из 16 изученных зародышей выявлены рекомбинантные хромосомы *H. vulgare*, несущие терминальные интрогрессии генетического материала *H. bulbosum*: у двух – по одной рекомбинантной хромосоме: 1-1HL (рис. 2с), 1 – не идентифицирована, но установлено, что она не является ни 1H, ни 5H, ни 6H; у одного – 2 интрогрессии (не идентифицированы: не являются ни 1H, ни 5H, ни 6H); у одного – 3 интрогрессии (одна – 1HL, вторая – 5HL или 6HL, третья – не идентифицирована). В остальных зародышах рекомбинантных хромосом культурного ячменя выявлено не было (рис. 2d).

Скрещивания гибрида с *H. vulgare* 'Borwina' (2x). При скрещивании гибрида с ячменем сорта 'Borwina' (2x), как при использовании его в качестве материнской формы, так и как опылителя, к 10-12 сут-

кам после опыления во всех зародышах отмечено наличие клеток, содержащих только геномный материал H. vulgare, а также идентифицирован остаточный хромосомный материал ячменя луковичного в виде микроядер или единичных хромосом (табл. 2, рис. 3). В большинстве зародышей этого возраста преобладали клетки, содержащие только хромосомы культурного ячменя (см. табл. 2). Лишь у одного 10-дневного зародыша, полученного при использовании гибрида в качестве материнской формы, наблюдали миксоплоидную структуру: в его составе, наряду с клетками H. vulgare, значительное количество миксоплоидных гибридных клеток, содержащих наряду с хромосомами культурного ячменя 1-5 хромосом ячменя луковичного и большое число микроядер H. bulbosum (см. рис. 3 d, e, f).

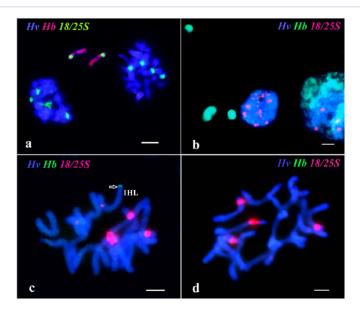


Рис. 2. Геномный состав клеток зародышей, полученных в результате самоопы ления тетраплоидного гибрида F, (H. bulbosum L. A17 (4x) × H. vulgare L. 'Borwina' (4x)) (HbHbHvHv)

а – конец анафазы митоза в клетке 9-ти дневного зародыша: 2 хромосомы 6Hb будут утрачены в процессе деления; b – ядра гибридной клетки и клетки, содержащей только хромосомы *Hv* и микроядра Hb 11-ти дневного зародыша; c, d – метафазные хромосомы диплоидных клеток *Hv* 11-ти дневного зародыша с рекомбинантной хромосомой *Hv*, несущей терминальную интрогрессию (указана стрелкой) хромосомы 1HL (c) и без рекомбинантных хромосом *Hv* (d)

Fig. 2. Genome composition of embryo cells obtained from self-pollination of the tetraploid F_2 hybrid (*H. bulbosum* L. A17 (4x) × *H. vulgare* L. 'Borwina' (4x)) (HbHbHvHv):

a – the end of anaphase of mitosis in a cell of a 9-day-old embryo: 2 chromosomes 6Hb of *H. bulbosum* will be lost during the division process; b – nuclei of a hybrid cell and a cell containing only *Hv* chromosomes and *Hb* micronuclei of an 11-day-old embryo; c, d – diploid cell of *Hv* of an 11-day-old embryo with a recombinant chromosome carrying terminal introgression (indicated by arrow) in 1HL chromosome (c) and without recombinant chromosomes of *Hv* (d).

Таблица 2. Характеристики геномного состава зародышей, полученных в результате скрещиваний гибрида F_2 (*H. bulbosum* A17 (4x) × *H. vulgare* 'Borwina' (4x)) (HbHbHvHv) с *H. vulgare* 'Borwina' (2x) (HvHv)

Table 2. Characteristics of the genomic composition of embryos obtained in crosses of the F₂ hybrid (*H. bulbosum* L. A17 (4x) × *H. vulgare* L. 'Borwina' (4x)) (HbHbHvHv) with *H. vulgare* 'Borwina' (2x) (HvHv)

Комбинация скрещивания / Cross combination	Возраст зародыша, сутки / age of the embryo, days	Число зароды-шей/ Number of embryos	Характеристика геномного состава зародыша/ Characteristics of the genomic composition of the embryo	Наличие хромосом с интрогрессией/ chromosomes with introgression
H ^v H ^v × HbHbHvHv	11-13	6	Преобладают клетки с хромосомами Hv^* (HvHv, 2n=14) , единичные микроядра Hb^{**} .	0
	10	1	Миксоплоидный зародыш: клетки с14 хромосомами Hv , 0-5 Hb , преобладают клетки только с хромосомами Hv (HvHv, 2n=14), микроядра Hb	0
HbHbHvHv× HvHv		1	Преобладают клетки с хромосомами Hv (HvHv, 2n=14) , микроядра Hb	1 - Hv ^{Hb***}
	12 -13	8	Преобладают клетки с хромосомами Hv (HvHv, 2n=14) , единичные микроядра Hb	0

 $^{^*}$ – H. vulgare, ** – H. bulbosum, *** – Hv^{Hb} – неидентифицированная хромосома H. vulgare с интрогрессией H. bulbosum (не является ни 1H , ни 5H ни 6H)

К 13 дню после опыления процесс элиминации хромосом ячменя луковичного в зародышах, полученных в результате реципрокных скрещиваний, практически завершен, наблюдаются лишь единичные микроядра,

образованные хромосомами H. bulbosum.

В хромосомном наборе одного из 16 изученных зародышей выявлена рекомбинантная хромосома *H. vulgare* с терминальной интрогрессией *H. bulbosum* (рис. 3 с).

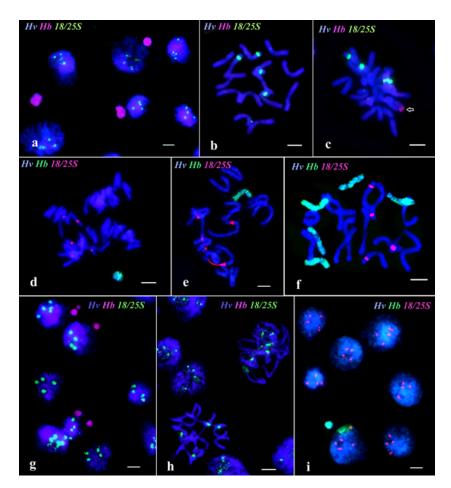


Рис. 3. Геномный состав клеток зародышей, полученных от скрещивания тетраплоидного гибрида F_2 (*H. bulbosum* L. A17 (4x) × *H. vulgare* L. 'Borwina' (4x)) (HbHbHvHv) с *H. vulgare* L. 'Borwina' (2x) а, b, c, d, e, f, i – гибрид использован в качестве материнской формы; g, h – гибрид использован как опылитель: а – микроядра *Hb* и ядра клеток, содержащие только хромосомы Hv 10-ти дневного зародыша; b – метафазные хромосомы диплоидной клетки Hv

и ядра клеток, содержащие только хромосомы Hv 10-ти дневного зародыша; b – метафазные хромосомы диплоидной клетки Hv (2n=2x=14) 10-ти дневного зародыша с практически полной элиминацией хромосом Hb; c – метафазные хромосомы диплоидной клетки Hv 10-ти дневного зародыша с рекомбинантной хромосомой, несущей терминальную интрогрессию (указана стрелкой); d, e, f – метафазные хромосомы клеток миксоплоидного 10-ти дневного зародыша: c диплоидным набором хромосом и полной элиминацией хромосом Hb (d); c одной хромосомой d0 (d0) и d0 хромосомами d10 угомосомами d20 угомосомами d30 угомосомами d40 (d60); d60 угомосомой d60 угомосомой d80 угомосомами d90 угомосомам

g — микроядра Hb и ядра клеток, содержащие только хромосомы Hv у 12-ти дневного зародыша; h — ядра клеток и метафазные хромосомы у 12-ти дневного зародыша с полной элиминацией генетического материала Hb и диплоидным набором хромосом Hv (2n=2x=14); i — микроядро Hb и ядро с неполной элиминацией хромосом Hb в клетках 12-ти дневного зародыша

Fig 3. Genome composition of embryo cells obtained in crosses of the tetraploid F_2 hybrid (*H. bulbosum* L. A17 (4x) × *H. vulgare* L. 'Borwina' (4x)) (HbHbHvHv) with *H. vulgare* L. 'Borwina' (2x)

a, b, c, d, e, f, i – the hybrid was used as the maternal form; g, h – hybrid was used as a pollinator: a – *Hb* micronuclei and cell nuclei containing only *Hv* chromosomes, nuclei of a 10-day-old embryo; b – metaphase chromosomes of a diploid *Hv* cell (2n=2x=14) in a 10-day-old embryo with almost complete elimination of *Hb* chromosomes; c – metaphase chromosomes of a diploid *Hv* cell in a 10-day-old embryo with a recombinant chromosome carrying terminal introgression (indicated by an arrow); d, e, f – metaphase chromosomes of a cells in a mixoploid 10-day embryo: with a diploid set of chromosomes and complete elimination of *Hb* chromosomes (d); with one *Hb* chromosome (e) and with five *Hb* chromosomes (f); g – *Hb* micronuclei and cell nuclei containing only *Hv* chromosomes in a 12-day-old embryo; h – cell nuclei and metaphase chromosomes of a 12-day-old embryo with complete elimination of *Hb* genetic material and a diploid set of *Hv* (2n=2x=14) chromosomes; I – *Hb* micronucleus and cell nucleus with incomplete elimination of *Hb* chromosomes in cells of a 12-day-old embryo

Скрещивания гибрида с *H. vulgare* 'Igri' (2x). В этой гибридной комбинации при использовании *H. vulgare* 'Igri' (2x) как в качестве материнской формы, так и в качестве опылителя, уже к 9-10 дню после опыления преобладают клетки, содержащие только геномный матери-

ал *H. vulgare*, но во всех зародышах этого возраста выявлены участки с остаточным хромосомным материалом ячменя луковичного в виде микроядер или единичных хромосом в клетках (табл. 3, рис. 4 a,b,c).

Таблица 3. Характеристики геномного состава зародышей, полученных в результате скрещивания гибрида F, (H. bulbosum A17 (4x) × H. vulgare 'Borwina' (4x)) (HbHbHvHv) с H. vulgare 'Igri' (2x) (HvHv)

Table 3. Characteristics of the genomic composition of embryos obtained in crosses of the F_2 hybrid (*H. bulbosum* A17 (4x) \times *H. vulgare* 'Borwina' (4x)) (HbHbHvHv) with *H. vulgare* 'Igri' (2x) (HvHv)

Комбинация скрещивания/ Cross combination	Возраст зародыша, сутки/ Age of the embryo, days	Число зародышей/ Number of embryos	Характеристика геномного состава зародыша/ Characteristics of the genomic composition of the embryo	Наличие хромосом с интрогрессией/ chromosomes with introgression
HvHv× HbHbHvHv	9	1	Преобладают клетки, содержащие только геномный материал Hv^* (HvHv, 2n=14). Единичные микроядра, образованные хромосомами Hb^{**} .	0
		1	Преобладают клетки, содержащие только геномный материал <i>Hv</i> (HvHv, 2n=14). Единичные микроядра, образованные хромосомами <i>Hb</i> .	0
	12	3	Только геномный материал Hv (HvHv, 2n=14). Микроядер Hb на выявлено	0
	12	1	Только геномный материал <i>Hv</i> (HvHv, 2n=14). Микроядер <i>Hb</i> на выявлено	1 – 1 HL
		1	Гиперплоид <i>Hv</i> (HvHv, 2n=15): 1 дополнительная спутничная хромосома (5H или 6H). Микроядер <i>Hb</i> на выявлено	1 – 5HS или 6HS
	13	6	Только геномный материал <i>Hv</i> (HvHv, 2n=14). Генетического материала <i>Hb</i> не выявлено.	
	14	1	Только геномный материал Hv (HvHv, 2n=14). Микроядер и хромосом Hb не выявлено.	$1 - Hv^{Hb^{***}}$
HbHbHvHv× HvHv	10, 12	5	Преобладают клетки, содержащие только геномный материал <i>Hv</i> (HvHv, 2n=14). Единичные микроядра <i>Hb</i> и гибридные клетки с различным количеством генетического материала <i>Hb</i>	0

^{*-}H. vulgare, **-H. bulbosum, $***-Hv^{Hb}$ – неидентифицированная хромосома H.vulgare (не является ни 1H, ни 5H, ни 6H) с интрогрессией H.bulbosum

У 12-дневных зародышей преобладают клетки, содержащие только хромосомы культурного ячменя. Единичные микроядра и хромосомы *H. bulbosum* выявлены у одного зародыша, полученного при использовани культурного ячменя в качестве материнской формы, и у двух изученных зародышей в реципрокной комбинации (см. табл. 3, рис. 4d,e,g,h). В 13-ти и 14-ти дневных зародышах хромосом и микроядер ячменя луковичного не выявлено (см. табл. 3).

В трех из 14-ти изученных зародышей этой комбинации с полной элиминацией хромосом ячменя луковичного выявлено по одной рекомбинантной хромосоме с терминальной интрогрессией генетического материала *H. bulbosum*, две из которых идентифицированы: в одном

зародыше — интрогрессия в хромосоме 1HL, в другом — в 5HS или 6HS (рис. 4f). Во втором случае зародыш имеет дополнительную сателлитную (5H или 6H) хромосому (см. рис. 4f).

Скрещивания гибрида с *H. bulbosum* A17 (4х). GISH-анализ шестнадцати 11-ти -16-ти дневных зародышей, полученных в результате опыления тетраплоидного гибрида пыльцой родительского клона ячменя луковичного показал, что 15 из них имеют эуплоидный гибридный набор хромосом (геномный состав HbHbHbHv, 2n=4x=21 Hb + 7 Hv) (табл. 4, рис. 5b), один зародыш — с анеуплоидным гибридным набором хромосом: 17 Hb и 8 Hv (см. табл. 4, рис. 5c).

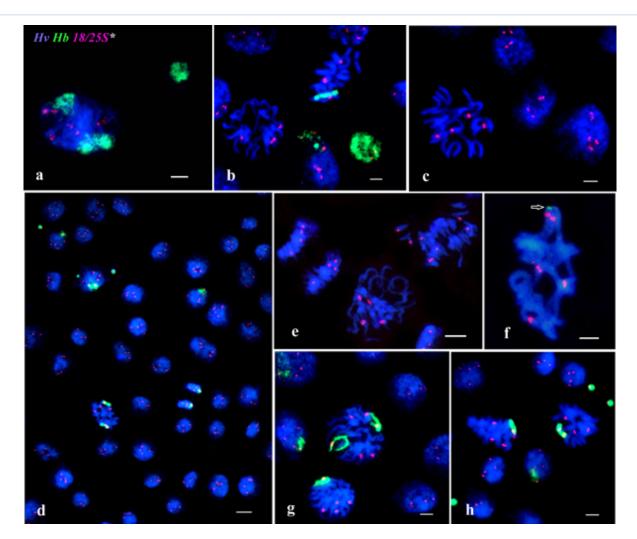


Рис. 4. Геномный состав клеток зародышей, полученных от скрещиваний тетраплоидного гибрида F_2 (*H. bulbosum* L. A17 (4x) × *H. vulgare* L. 'Borwina' (4x)) (HbHbHvHv) с *H. vulgare* L. 'Igri' (2x)

b, c, e, g, h – гибрид использован в качестве материнской формы; а, d, f – гибрид использован в качестве опылителя: а –микроядро *Hb* и ядро с неполной элиминацией в клетке 9-ти дневного зародыша; b, c – микроядро *Hb* и метафазные хромосомы в клетке с неполной элиминацией хромосом *Hb*, ядра с полной элиминацией хромосом *Hb* (b) и ядра и метафазные хромосомы в клетках с полной элиминацией хромосом *Hb* (c) 10-дневного зародыша; d, e – микроядро *Hb* и метафазные хромосомы в клетке с неполной элиминацией хромосом *Hb*, ядра с полной элиминацией хромосом *Hb* (d) и делящиеся клетки, содержащие только хромосомы *Hv* (e) 12-ти дневного зародыша; f – клетка зародыша с гиперплоидным набором хромосом *Hv*: дополнительная хромосома – 5H или 6H, одна из которых с терминальной интрогрессией *Hb* в коротком плече (указана стрелкой); g, h – ядра и хромосомы делящихся клеток 12ти-дневного зародыша с незавершившейся элиминацией хромосом *Hb* в некоторых клетках: встречаются ядра и делящиеся клетки с одной или двумя хромосомами 6Hb, а также микроядра, образованные хромосомой 6Hb. (* – цвет соответствующих хромосом и проб (зондов) на всех рисунках)

Fig 4. Genome composition of embryo cells obtained in crosses of the tetraploid F_2 hybrid (*H. bulbosum* L. A17 (4x) × *H. vulgare* L. 'Borwina' (4x)) (HbHbHvHv)) with *H. vulgare* L. 'Igri' (2x)

b, c, e, g, h – the hybrid was used as the maternal form; a, d, f – the hybrid was used as a pollinator: a – *Hb* micronucleus and a nucleus with incomplete elimination in the cell of a 9-day-old embryo; b, c – *Hb* micronucleus and metaphase chromosomes of a cell with incomplete elimination of *Hb* chromosomes, nuclei with complete elimination of Hb chromosomes (b) and nuclei and metaphase chromosomes of cells with complete elimination of *Hb* chromosomes, nuclei with complete elimination of *Hb* chromosomes, nuclei with complete elimination of *Hb* chromosomes, nuclei with complete elimination of *Hb* chromosomes (d) and dividing cells containing only *Hv* chromosomes (e) of a 12-day-old embryo; f – embryo cell with a hyperploid set of chromosomes *Hv*: additional chromosome – 5H or 6H, one of them with terminal introgression of *Hb* in the short arm (indicated by arrow); g, h – nuclei and chromosomes of dividing cells in a 12-day-old embryo with incomplete elimination of *Hb* chromosomes in some cells: there are nuclei and dividing cells with 1 or 2 6Hb chromosomes, as well as micronuclei formed from the 6Hb chromosome. (* - color of corresponding chromosomes and samples (probes) in all figures)

Таблица 4. Характеристика геномного состава зародышей, полученных в результате реципрокных скрещиваний гибрида F_2 (*H. bulbosum* L. A17 (4x) × *H. vulgare* L. 'Borwina' (4x)) (HbHbHvHv) с тетраплоидным *H. bulbosum* A17 (4x) (HbHbHbHb)

Table 4. Characteristics of genomic composition of embryos obtained in reciprocal crosses of the F_2 hybrid (*H. bulbosum* L. A17 (4x) × *H. vulgare* L. 'Borwina' (4x)) (HbHbHvHv) with tetraploid *H. bulbosum* L. A17 (4x) (HbHbHbHb)

Комбинация скрещивания/ Cross combination	Возраст зародыша, сутки/ age of the embryo, days	Число зародышей/ Number of embryos	Характеристика геномного состава зародыша/ Characteristics of the genomic composition of the embryo	Хромосом с интрогрессией/ Chromosomes with introgression
НьНьНьНь × НьНьНьНь	11	1	Гибридные зародыши – $2n = 4x : 21 \ Hb + 7 \ Hv^*$. Элиминации хромосом Hb^{**} не отмечено	1-1HL
		1	Гибридные зародыши — $2n = 4x : 21 \ Hb + 7 \ Hv$. Элиминации хромосом Hb не отмечено	1- Hb ^{Hv***}
		1	Гибрид с 17 хромосомами <i>Hb</i> и 8 хромосомами <i>Hv</i> . Дополнительная хромосома – 1HL	0
	11-16	13	Гибридные зародыши — $2n = 4x : 21 \ Hb + 7 \ Hv$. Элиминации хромосом Hb не отмечено	0
НьНьНьНь × НьНьНvHv	13	2	Гибридные зародыши — $2n = 4x : 21 \ Hb + 7 \ Hv$. Элиминации хромосом Hb не отмечено	0

^{* –} H. vulgare, ** – H. bulbosum

Для всех изученных зародышей, как эуплоидных, так и анеуплоидных, характерна стабильность числа хромосом, микроядер не выявлено (рис. 5а). Среди 15 эуплоидных зародышей выявлено два с рекомбинантными хромосомами: у одного выявлена одна хромосома *H. bulbosum* с терминальной интрогрессией *H. vulgare* (рис. 5d), у другого – хромосома 1H *H. vulgare* с терминальной интрогрессией генетического материала *H. bulbosum* (рис. 5е).

При использовании *H. bulbosum* в качестве материнской формы были получены только два зародыша. Они имели эуплоидный гибридный набор хромосом (геномный состав HbHbHbHv, 2n=4x=21 Hb + 7 Hv). Зародыши, отобранные на 13 день после опыления, были цитологически стабильны, элиминации хромосом какого-либо из родителей не выявлено, микроядер не обнаружено (см. табл. 4).

Обсуждение

Родительский клон ячменя луковичного *H. bulbosum* A3 (4х), который был использован для получения межвидового гибрида, изученного в работе, характеризуется рядом ценных признаков, в частности, устойчивостью к *Rhynchosporium secalis* (Pickering et al., 2006b), к вирусам BYDV, WDV, BaMMV, BaYMV (Michel, 1996; Наbekuß et al., 2004; Schliephake et al., 2013), показана возможность передачи ряда генов устойчивости от этого клона культурному ячменю при межвидовой гибридизации (Shtaya et al., 2007; Scholz et al., 2009, Johnston et al.,

2013; Yu et al, 2018). Частично фертильный тетраплоидный гибрид, полученный с участием клона *Hordeum bulbosum* A17, может быть использован для создания серии линий ячменя с интрогрессиями генетического материала *H. bulbosum* в разные хромосомы и с участием различных сортов *H. vulgare*.

Главной задачей нашего исследования являлось изучение особенностей, связанных с элиминацией хромосом ячменя луковичного в эмбриогенезе в различных комбинациях скрещиваний с участием частично фертильного гибрида F_2 (H. bulbosum A17 (4x) × H. vulgare 'Borwina' (4x)) для создания оптимальной для данного гибрида схемы получения интрогрессивных линий культурного ячменя.

Ранее показано, что для мейоза изучаемого нами тетраплоидного гибрида характерно наличие гомеологичных ассоциаций хромосом родительских видов, в которых с разной частотой участвуют все плечи хромосом, кроме короткого плеча хромосомы 1Н. В потомстве от самоопыления этого гибрида выявлены растения с рекомбинантными хромосомами *H. vulgare*, несущими интрогрессии генетического материала *H. bulbosum* в терминальных участках различных плеч хромосом, кроме 1НS (Scholz, Pendinen, 2017). Таким образом, существует потенциальная возможность обменов между участками гомеологичных хромосом, которая может быть обусловлена наличием гомологичных участков в гомеологичных хромосомах, либо ослаблением генетического контроля, блокирующего рекомбинацию между гомеологами.

^{*** –} Hb^{Hv} – хромосома H. bulbosum с интрогрессией H. vulgare

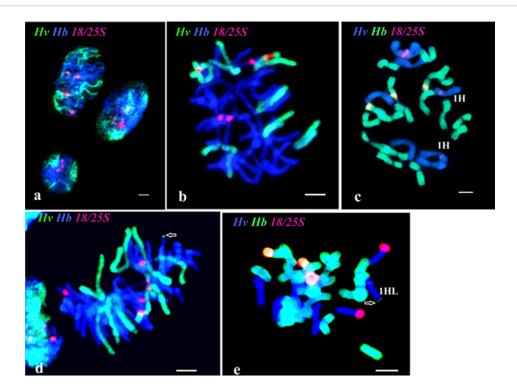


Рис. 5. Геномный состав клеток зародышей, полученных в результате скрещивания тетраплоидного гибрида F_2 (*H. bulbosum* A17 (4x) × *H. vulgare* L. 'Borwina' (4x)) (HbHbHvHv) с *H. bulbosum* (4x) а – гибридные клетки 11-ти дневного зародыша, микроядер не отмечено; b – клетка гибридного 11-ти дневного зародыша (HbHbHbHv): 7 хромосом *Hv* и 21 хромосома *Hb*; с – клетка анеуплоидного 13-ти дневного гибридного зародыша: 8 хромосом *Hv* (экстрахромосома 1H) и 17 хромосом *Hb*; d – клетка 11-ти дневного гибридного зародыша (HbHbHbHv) с рекомбинантной хромосомой *Hb*, несущей терминальную интрогрессию *Hv* (указана стрелкой); е – клетка 13-ти дневного гибридного зародыша (HbHbHbHv) с рекомбинантной хромосомой *Hv*,

несущей терминальную интрогрессию Нв в длинном плече хромосомы 1Н (указана стрелкой)

Fig. 5. Genome composition of embryonic cells obtained in crosses of the tetraploid F₂ hybrid (*H. bulbosum* L. A17 (4x) × *H. vulgare* L. 'Borwina' (4x)) (HbHbHvHv) with *H. bulbosum* (4x) a – hybrid cells of the 11-day-old embryo, micronuclei not observed; b – a hybrid cell of the 11-day-old embryo (HbHbHbHv): 7 chromosomes *Hv* and 21 chromosomes *Hb*; c – a cell of the aneuploid 13-day-old hybrid embryo: 8 chromosomes *Hv* (extrachromosome 1H) and 17 chromosomes *Hb*; d – a cell of the 11-day-old hybrid embryo (HbHbHbHv) with a recombinant *Hb* chromosome carrying terminal introgression *Hv* (indicated by arrow); e – a cell of the 13-day-old hybrid embryo (HbHbHbHv) with the recombinant *Hv* chromosome carrying terminal introgression of *Hb* in the long arm of chromosome 1H (indicated by arrow)

В нашем исследовании анализ хромосомного состава зародышей различного возраста, полученных в результате самоопыления, используемого в исследовании частично фертильного межвидового тетраплоидного гибрида, выявил тенденцию к элиминации хромосом в зародышах разного возраста. Среди 9-ти – 14-ти дневных зародышей более половины характеризуются практически полной элиминацией хромосом *H. bulbosum*, остальные миксоплоиды с тенденцией к элиминации хромосом H. bulbosum. Гибридных зародышей со стабильным хромосомным составом не выявлено. В ранее проведенном исследовании среди растений в потомстве от самоопыления частично фертильного гибрида F₂ (H. bulbosum A17 (4x) \times *H. vulgare* 'Borwina' (4x)) были выявлены гибридные формы (80%) и растения ячменного типа (HvHv, 20 %) (Scholz, Pendinen, 2017). Среди гибридных растений, наряду с эуплоидными формами (HvHvHbHb, 2n = 4x=28, 31,4%), выявлены анеуплоидные растения (8,6%), в большинстве своем - гипоплоиды с числом хромосом от 21 до 27, а также миксоплоидные гибриды с тенденцией к элиминации хромосом ячменя луковичного (40%). Миксоплоидные растения, как правило, нежизнеспособны и гибнут на стадии проростка или в начале кущения. Эти данные расходятся с результатами анализа хромосомного состава зародышей. Известно, что на элиминацию хромосом H. bulbosum в эмбриогенезе в значительной мере влияет температура: при развитии гибридных зародышей при температуре выше 20°C, интенсивность элиминации хромосом ячменя луковичного значительно выше, чем при 15°C и 17,5°C (Pickering, 1985). Таким образом, при самоопылении гибрида в условиях теплицы при температуре выше 20°C

в потомстве следует ожидать нежизнеспособные миксоплоидные проростки или растения H. vulgare (2x). Полученные таким образом растения ячменнного типа по хромосомному составу должны соответствовать озимому сорту 'Borwina'(2x), но будут иметь цитоплазму ячменя луковичного. Отобранные в потомстве от самоопыления частично фертильного гибрида F_2 (H. bulbosum A17 (4x) \times H. vulgare 'Borwina' (4x)) растения ячменого типа с рекомбинантными хромосомами далее могут быть использованы для скрещивания с растениями ячменя других сортов. В потомстве от таких скрещиваний возможен отбор форм, несущих интрогрессии. Самоопыление таких форм и дальнейший отбор отдельных растений в их потомстве даст возможность получить линии с интрогрессиями в обеих гомологичных хромосомах.

В возвратных скрещиваниях гибрида F, (H. bulbosum A17 (4x) × H. vulgare 'Borwina' (4x)) с H. vulgare использовали два сорта: 'Igri' (2x) и 'Borwina' (2x). Эти сорта были выбраны на основании результатов, свидетельствующих о различных темпах элиминации в гибридных зародышах с соотношением родительских геномов 1Hv:1Hb, полученных с участием этих сортов. При использовании этих ячменей в реципрокных комбинациях скрещиваний с межвидовым гибридом было показано, что во всех комбинациях уже на 10-11-й день после опыления элиминация хромосом ячменя луковичного в зародышах завершается, лишь в отдельных клетках выявляются единичные хромосомы ячменя луковичного, а также встречаются микроядра, образованные хромосомным материалом ячменя луковичного. Остаточный генетический материал ячменя луковичного, идентифицированный практически во всех зародышах, свидетельствует о том, что в оплодотворении участвовали гаметы гибрида, несущие генетический материал обоих родительских видов, предположительно, с геномным составом (HbHv). В потомстве от таких скрещиваний будут только растения культурного ячменя, в зависимости от направления скрещивания они будут иметь цитоплазму H. vulgare или H. bulbosum. Среди них можно выявить формы с рекомбинантными хромосомами культурного ячменя с интрогрессией генетического материала *H. bulbosum*. Уже в первом поколении от самоопыления этих форм можно отобрать линии с интрогрессиями в обеих гомологичных хромосомах. В такой схеме для получения интрогрессивных линий в скрещивании с гибридом могут быть использованы различные диплоидные сорта культурного ячменя, включая те, которые, подобно 'Borwina' и 'Emir', в результате скрещивания с ячменем луковичным при соотношении геномов 1Hv:1Hb, дают гибридное потомство (Szigat, Pohler, 1982,. Zhang et al., 1999; Pickering et al., 2004, 2006a; Scholz, Pendinen, 2017).

В реципрокных скрещиваниях гибрида F_2 (*H. bulbosum* A17 (4x) × *H. vulgare* 'Borwina' (4x)) с тетраплоидным *H. bulbosum* A17 (4x) получаются гибридные зародыши со стабильным хромосомным составом (21 Hb+7 Hv) у большинства зароды-

шей; элиминации хромосом не выявлено. Хромосомный состав зародышей (21 Нb + 7 Нv) свидетельствует о том, что в оплодотворении участвовали эуплоидные гаметы гибрида с геномным составом НьНу. Анеуплоидный гибридный набор хромосом у одного из зародышей, вероятно, является следствием участия в оплодотворении анеуплоидной гаметы с потерей (4x) хромосом *H. bulbosum* и экстрахромосомой 1HL: возможно, при расхождении поливалентной гомеологичной ассоциации (тривалента НЬН или тетравалента НЬНЬН уНу) хромосом в первом делении мейоза могла появиться гамета с дополнительной хромосомой 1HL H. vulgare. Хромосомный состав зародышей (21 Hb + 7 Hv) свидетельствует о том, что в оплодотворении участвовали эуплоидные гаметы гибрида с геномным составом НьНу. Процесс получения интрогрессивных форм культурного ячменя на основе гибридов с геномным составом НвНвНь, вероятно, будет длительным и трудоемким, поскольку несбалансированный геномный состав пыльцы растений, полученных в такой комбинации, приведет к полной мужской стерильности, а яйцеклетки окажутся нежизнеспособными. Кроме того, при соотношении геномов 3Hb:1Hv со значительным преимуществом числа хромосом генома ячменя луковичного, должно потребоваться больше, чем один цикл возвратных скрещиваний на культурный ячмень для полной элиминации хромосом H. bulbosum и получения форм культурного ячменя с интрогрессиями. Хотя следует отметить, что теоретически у тетраплоидов с геномным составом НьНьНь частота Нь-Ну гомеологичного спаривания, а возможно, и частота гомеологичной рекомбинации должна быть выше, чем у тетраплоидного гибрида со сбалансированным геномным составом НвНьНvНv, но из-за возможной стерильности пыльцы этот рекомбинационный потенциал может не реализоваться. Возможность использования гибридных форм с геномным составом НьНьНь требует дополнительных исследований.

Заключение

Во всех изученных комбинациях скрещиваний гибрида F_{γ} (*H. bulbosum* L. A17 (4x) \times *H. vulgare* L. выявлены зародыши с рекомбинантными хромосомами H. vulgare, несущими чужеродный генетический материал ячменя луковичного, что свидетельствует о возможности получения интрогрессивных линий ячменя во всех изучаемых вариантах скрещиваний. Но, исходя из полученных результатов, для массового получения интрогрессивных линий культурного ячменя различных сортов на основе частично фертильного гибрида F_2 (*H. bulbosum* A17 (4x) × H.vulgare 'Borwina' (4x)) (НbНbНvНv), наиболее эффективным является скрещивание с сортами культурного ячменя H. vulgare (2x) как при использовании гибрида в качестве опылителя, так и в качестве материнской формы, поскольку независимо от сорта ячменя и направления скрещивания в эмбриогенезе происходит интенсивная элиминация хромосом H. bulbosum. В потомстве от

таких скрещиваний будут только растения культурного ячменя, среди которых можно выявить растения с интрогрессией H. bulbosum, и уже в первом поколении от их самоопыления отобрать интрогрессивные линии. При такой схеме скрещивания с частично фертильным гибридом F_2 (H. bulbosum A17 (4x) × H. vulgare 'Borwina' (4x)) (HbHbHvHv) для получения интрогрессивных форм H. vulgare могут быть использованы различные диплоидные сорта ячменя, включая те, которые при скрещивании с диплоидным H. bulbosum дают гибридное потомство.

References/Литература

- Bothmer R. von, Jacobsen N., Baden C., Jørgensen R.B., Linde-Laursen I. An ecogeographical study of genus *Hordeum*. Rome: IPGR: 1991.
- Devaux P. The *Hordeum bulbosum* (L.) method. In: M. Maluszynski, K.J. Kasha, B.P. Forster, I. Szarejko (eds.). *Doubled haploid production in crop plants*. Dordrecht: Springer; 2003. p.15-19. DOI: 10.1007/978-94-017-1293-4_3
- Fukuyama T., Hosoya H. Genetic control and mechanism of chromosome elimination in the hybrids between *Hordeum bulbosum* (4x) and *H. vulgare* (4x). *Japanese Journal of Genetics*. 1983;58:241-250. DOI: 10.1266/jjg.58.241
- Gilpin M.J., Pickering R.A., Fautrier A.G., McNeil D.L., Szigat G., Hill A.M., Kynast R.G. Morphological and molecular analysis of androgenetic, selfed and backcrossed plants produced from a *Hordeum vulgare* × *H. bulbosum* hybrid. *Plant Breeding*. 1997;116(6):505-510. DOI: 10.1111/j.1439-0523.1997.tb02181.x
- Habekuß A., Schliephake E., Ehrig F. Hordeum bulbosum a source for BYDV resistance. In: J. Spunar, J. Janicova (eds.) Proceedings of the 9th international barley genetics symposium; 2004 June 20-26; Brno, Czech Republic. Brno: Agricultural Research Institute Kromeriz; 2004. p.787-791.
- Ho K.M., Kasha K.J. Genetic control of chromosome elimination during haploid formation in barley. *Genetics*. 1975;51(2):263-275.
- Hoseinzadeh P., Ruge-Wehling B., Schweizer P., Stein N., Pidon H. High resolution mapping of a *Hordeum bulbosum*-derived powdery mildew resistance locus in barley using distinct homologous introgression lines. *Frontiers in Plant Science*. 2020;11:225. DOI: 10.3389/fpls.2020.00225
- Johnston P.A., Niks R.E., Meiyalaghan V., Blanchet E., Pickering R. *Rph22*: mapping of a novel leaf rust resistance gene introgressed from the non-host *Hordeum bulbosum* L. into cultivated barley (*Hordeum vulgare* L.) *Theoretical and Applied Genetics*. 2013;126:1613-1625. DOI: 10.1007/s00122-013-2078-9
- Johnston P.A., Timmerman-Vaughan G.M., Farnden K.J.F., Pickering R. Marker development and characterisation of *Hordeum bulbosum* introgression lines: a resource for barley improvement. *Theoretical and Applied Genetics*. 2009;118:1429-1437. DOI: 10.1007/s00122-009-0992-7
- Jones I.T., Pickering R.A. The mildew resistance of *Hordeum bulbosum* and its transference into *H. vulgare* genotypes. *Annals of Applied Biology.* 1978;88:295-298. DOI: 10.1111/j.1744-7348.1978. tb00709.x
- Kasha K.J., Kao K.N. High frequency haploid production in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Nature*. 1970;225(5235):874-876. DOI: 10.1038/225874a0
- Lange W. Crosses between Hordeum vulgare L. and Hordeum bulbosum L. l. Production, Morphology and meiosis of hybrids, haploids and dihaploids. Euphytica. 1971a;20(1):14-29. DOI: 10.1007/BF00146769
- Lange W. Crosses between *Hordeum vulgare* L. and *Hordeum bulbosum* L. 2. Elimination of Chromosomes in Hybrid Tissues. *Euphytica*. 1971b;20(2):181-194. DOI: 10.1007/BF00056078
- Michel M. Untersuchungen zur Übertragung von Resistenzgenen aus der Wildart Hordeum bulbosum L. in die Kulturgerste Hordeum vulgare L. PhD Thesis, Lehrstuhl für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, [dissertation]. München: Technische Universität München; 1996. [in German]

- Pendinen G.I., Chernov V.E., Scholz M. Biological characterization of introgressive barley lines obtained on the basis of the interspecific hybrid Hordeum vulgare L. × H. bulbosum L. (HvHbHb). Plant Biotechnology and Breeding. 2018;1(1):16-24. [in Russian] (Пендинен Г.И., Чернов В.Е., Шольц М. Характеристика интрогрессивных линий ячменя, полученных на основе межвидового гибрида Hordeum vulgare L. × H. bulbosum L. Биотехнология и селекция растений. 2018;1(1):16-24). DOI: 10.30901/2658-6266-2018-1-16-24
- Pendinen G.I., Scholz M. Homoeologous chromosome pairing at metaphase I of meiosis in *Hordeum vulgare* L. × *H. bulbosum* L. triploid hybrids (HvHbHb). *Plant Biotechnology and Breeding*. 2020;3(2):6-15. [in Russian] (Пендинен Г.И., Шольц М. Спаривание гомеологичных хромосом в метафазе I мейоза у триплоидных гибридов *Hordeum vulgare* L. × *H. bulbosum* L. (HvHbHb). *Биотехнология и селекция растений*. 2020;3(2):6-15). DOI: 10.30901/2658-6266-2020-2-02
- Pendinen G.I., Scholz M., Schrader O., Habekuß A. Using of bulbous barley Hordeum bulbosum L. for widening of genetic diversity of Hordeum vulgare L. Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding. 2013;171:123-126. [in Russian] (Пендинен Г.И., Шольц М., Шрадер О., Хабекус А. Использование ячменя луковичного Hordeum bulbosum L. для расширения генетического разнообразия Hordeum vulgare L. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2013;171:123-126).
- прикладной ботанике, генетике и селекции. 2013;171:123-126).

 Pickering R.A., Timmerman G.M., Cromey M.G., Melz G. Characterisation of progeny from backcrosses of triploid hybrids between Hordeum vulgare L. (2x) and H. bulbosum L (4x) to H. vulgare. Theoretical and Applied Genetics. 1994;88(3-4):460-464. DOI: 10.1007/BF00223661
- Pickering R.A. The production of fertile triploid hybrids from crosses between *Hordeum vulgare* L. (2n=4x=28) and *H. bulbosum* L. (2n=2x=14). *Hereditas*. 1991;114(3):227-236. DOI: 10.1111/j.1601-5223.1991.tb00329.x
- Pickering R.A., Klatte S., Butler R.C. Identification of all chromosome arms and their involvement in meiotic homoeologous associations at metaphase I in 2 *Hordeum vulgare* L. × *Hordeum bulbosum* L. hybrids. *Genome*. 2006a;49(1):73-78. DOI: 10.1139/g05-071
- Pickering R.A., Hudakova S., Houben A., Jouhnson P., Butler R.C. Reduced metaphase I associations between the short arms of homoeologous chromosomes in a *Hordeum vulgare* L. × *H. bulbosum* L. diploid hybrid influences the frequency of recombinant progeny. *Theoretical and Applied Genetics*. 2004;109(5):911-916. DOI: 10.1007/s00122-004-1725-6
- Pickering R., Malyshev S., Künzel G., Johnston P. A., Korzun V., Menke M., Schubert I. Locating introgressions of *Hordeum bulbosum* chromatin within the *H. vulgare* genome. *Theoretical and Applied Genetics*. 2000;100(1):27-31. DOI: 10.1007/PL00002904
- Pickering R., Ruge-Wehling B., Johnston P.A., Schweizer G., Ackermann P., Wehling P. The transfer of a gene conferring resistance to scald (*Rhynchosporium secalis*) from *Hordeum bulbosum* into *H. vulgare* chromosome 4HS. *Plant Breeding*. 2006b;125(6):576-579. DOI: 10.1111/j.1439-0523.2006.01253.x
- Pidon H., Ruge-Wehling B., Will T., Habekuß A., Wendler N., Oldach K., Maasberg-Prelle A., Korzun V., Stein N. Highresolution mapping of *Ryd4*^{Hb}, a major resistance gene to *barley yellow dwarf virus* from *Hordeum bulbosum. bioRxiv preprint*. 2023. DOI: 10.1101/2023.09.19.558385
- Pidon H., Wendler N., Habekuß A., Maasberg A., Ruge-Wehling B., Perovic D., Ordon F., Stein N. High-resolution mapping of *Rym14*^{Hb}, a wild relative resistance gene to barley yellow mosaic disease. *Theoretical and Applied Genetics*. 2021;134(3):823-833. DOI: 10.1007/s00122-020-03733-7
- Ruge B., Linz A., Pickering R., Proeseler G., Greif P., Wehling P. Mapping of *Rym14Hb*, a gene introgressed from *Hordeum bulbosum* and conferring resistance to BaMMV and BaYMV in barley. *Theoretical and Applied Genetics*. 2003;107(6):965-971. DOI: 10.1007/s00122-003-1339-4
- Ruge-Wehling B., Linz A., Habekuß A., Wehling P. Mapping of *Rym16Hb*, the second soil-born virus-resistance gene introgressed from *Hordeum bulbosum*. *Theoretical and Applied Genetics*. 2006;113(5):867-873. DOI: 10.1007/s00122-006-0345-8
- Schliephake E., Habekuss A., Scholz M., Ordon F. Barley yellow dwarf

- virus transmission and feeding behaviour of *Rhopalosiphum padi* on *Hordeum bulbosum* clones. *Entomologia Exsperimentalis et Applicata*. 2013;146(3):347-356. DOI: 10.1111/eea.12033
- 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*. 2017;150(2):139-149. DOI: 10.1159/000455141
- Scholz M., Ruge-Wehling B., Habekuß A., Schrader O., Pendinen G., Fischer K., Wehling P. *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
- Shtaya M.J.Y., Sillero J.C., Flath K., Pickering R., Rubiales D. The resistance to leaf rust and powdery mildew of recombinant lines of barley (*Hordeum vulgare* L.) derived from *H. vulgare* × *H. bulbosum* crosses. *Plant Breeding*. 2007;126(3):259-267. DOI: 10.1111/j.1439-0523.2007.01328.x
- Szigat G., Pohler W. *Hordeum bulbosum* × *H. vulgare* hybrids and their backcrosses with cultivated barley. *Cereal Research Communications*. 1982;10(1/2):73-78.
- Wendler N., Mascher M., Himmelbach A., Bini F., Kumlehn J., Stein N. A high-density, sequence-enriched genetic map of *Hordeum bulbosum* and its collinefrity to *H. vulgare. The Plant Genome*.

- 2017;10(3):1-11. DOI: 10.3835/plantgenome2017.06.0049
- Yakura K., Tanifuji S. Molecular cloning and restriction analysis of Eco RI-fragments of Vicia faba rDNA. Plant and Cell Physiology. 1983;24(7):1327-1330. DOI: 10.1093/oxfordjournals.pcp.a076650
- Yu X., Kong H.Y., Meiyalaghan V., Casonato S., Chng S., Jones E.E., Butler R.C., Pickering R., Johnston P.A. Genetic mapping of a barley leaf rust resistance gene *Rph26* introgressed from *Hordeum bulbosum*. *Theoretical and Applied Genetics*. 2018;131:2567-2580. DOI: 10.1007/s0012 2-018-3173-8
- Yu X., Casonato S., Jones E., Butler R.C., Johnston P.A., Chng S. Phenotypic characterization of the *Hordeum bulbosum* derived leaf rust resistance genes *Rph22* and *Rph26* in barley. *Journal* of *Applied Microbiology*. 2022;133:2083-2094. DOI: 10.1111/ jam.15710
- Zhang L, Pickering R, Murray B.G. Direct measurement of recombination frequency in interspecific hybrids between Hordeum vulgare and H. bulbosum, using genomic in situ hybridization. Heredity. 1999;83(3):304-309. DOI: 10.1038/sj.hdy.6885710
- Zhang L, Pickering R, Murray B.G. *Hordeum vulgare* × *H. bulbosum* tetraploid hybrid provides useful agronomic introgression lines for breeders. *New Zealand Journal of Crop and Horticulture Science*. 2001;29(4):239-246. DOI: 10.1080/01140671.2001.9514185

Информация об авторах

Галина Ивановна Пендинен, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Отдел биотехнологии, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44, pendinen@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2814-7074

Владимир Евгеньевич Чернов, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Отдел светофизиологии растений и биопродуктивности агроэкосистем, Агрофизический научно-исследовательский институт, 195220 Россия, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14, vechernov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2440-3782

Маргрет Шольц, PhD, Institute for Breeding Research on Agricultural Crops (Zl), Federal Research Centre for Cultivated Plants, Julius Kühn-Institut Rudolf–Schick-Platz, 3a, Groß Lüsewitz, Sanitz, 18190 Germany, margret.scholz@t-online.de

Information about the authors

Galina I. Pendinen, Cand. Sci (Biology), Senior Researcher, Department of Biotechnology, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 42, 44, Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190000 Russia, pendinen@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2814-7074 Vladimir E. Chernov, Cand. Sci (Biology), Senior Researcher, Department of Plant Light Physiology and Agroecosystem Bioproductivity, Agrophysical Research Institute, 14, Grazhdanskiy Avenue, St. Petersburg, 195220 Russia, vechernov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2440-3782 Margaret Scholz, PhD, Institute for Breeding Research on Agricultural Crops (Zl), Julius Kühn-Institut Federal Research Centre for Cultivated Plants, 3a, Rudolf—Schick-Platz, Groß Lüsewitz, Sanitz, 18190 Germany, margret.scholz@t-online.de

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 15.01.2024; одобрена после рецензирования 21.02.2024; принята к публикации 20.03.2024.

The article was submitted on 15.01.2024; approved after reviewing on 21.02.2024; accepted for publication on 20.03.2024.

Научная статья УДК 635.21:631.539:631.527.3:631.524.86:577.21

DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1-01



Использование андрогенеза *in vitro* для вовлечения в селекцию межвидовых гибридов *Solanum tuberosum* L. с диким аллотетраплоидным видом картофеля *S. stoloniferum* Schltdl. et Bouché

А. П. Ермишин, А. С. Агеева, Е. В. Воронкова, В. И. Лукша, О. Н. Гукасян, В. М. Жарич

Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Автор, ответственный за переписку: Александр Петрович Ермишин, ermishin@igc.by

Дикий аллотетраплоидный вид картофеля из Мексики Solanum stoloniferum Schltdl. & Bouché рассматривают как ценный источник генов устойчивости к болезням и вредителям для использования в селекции. Однако интрогрессия генов устойчивости этого вида в селекционный материал затруднена из-за жестких межвидовых репродуктивных барьеров. Один из них — геномные различия между S. stoloniferum (геномный состав AABB) и S. tuberosum L. (AAAA). Это ставит под сомнение возможность переноса в геном культурного картофеля многообразия ценных генов дикого вида, локализованных на хромосомах его генома В. Предлагается получать тетраплоидные (4x, AAAB) межвидовые гибриды с S. stoloniferum, у которых предпосылки для гомеологичной рекомбинации выше, чем у обычно используемых в схемах интрогрессии пентаплоидных гибридов (AAAAB). Однако тетраплоидные гибриды имеют эффективную плоидность 3 EBN, что затрудняет их беккроссирование на культурный картофель (4x, 4 EBN). Так, попытки вовлечь в гибридизацию с сортами картофеля полученный нами тетраплоидный гибрид S. stoloniferum IGC16/36.1 в течение ряда лет были безуспешными. Для решения проблемы нами предложено использовать методический прием, основанный на получении тетраплоидных растений-регенерантов в культуре пыльников этого гибрида. Целью настоящего исследования было оценить эффективность применения этого приема.

В 2018 году было получено тридцать одно растение-регенерант (андрогенные клоны, андроклоны) в культуре пыльников гибрида IGC 16/36.1. Большинство андроклонов превосходили исходный гибрид по мощности габитуса и интенсивности цветения. В результате скрещиваний 2019 года получено 1039 гибридных семян (8,7 семян/ опыление) между 21 андроклоном и сортом 'Lemhi Russet', 1017 семян (7,5 семян/ опыление) между 23 андроклонами и сортом 'Quarta', 716 семян (12,3 семян/ опыление) между 11 андроклонами и диплоидной линией IGC 17n8, способной образовывать фертильную нередуцированную (2n) пыльцу. Семена обладали высокой всхожестью — 70-90%. Среди андроклонов, давших потомство в скрещиваниях с сортами, выявлены генотипы, несущие маркеры генов устойчивости к фитофторозу (*Rpi-sto1*, *R2* и *R3b*), PVY (*Ry* adg, *Ry* sto и *Ry* chc) и раку картофеля *Sen2*, отмеченные у исходного образца *S. stoloniferum* PI 205522 и у гибрида IGC 16/36.1. Несмотря на сложный характер наследования анализируемых маркеров в поколениях, которые были получены от беккросса андроклонов, выделен ряд гибридов, несущих несколько маркеров, в том числе гена *Rpi-sto1* высокой устойчивости к фитофторозу широкого спектра действия. Отобраны гибриды с относительно высокой клубневой продуктивностью и признаками культурного картофеля (клубнями правильной формы с мелкими глазками), обладающие высокой полевой устойчивостью к фитофторозу. Обсуждаются перспективы использования андроклонов тетраплоидного межвидового гибрида IGC 16/36.1 для повышения частоты гомеологичной А/В рекомбинации хромосом.

Ключевые слова: межвидовая гибридизация, культура пыльников, интрогрессия генов

Благодарности: работа выполнена в рамках государственной программы научных исследований «Биотехнологии» (2016—2020 гг.), задание 2.51 «Интрогрессия в селекционный материал генов дикого вида картофеля S. stoloniferum с помощью андрогенеза in vitro межвидовых гибридов».

Для цитирования: Ермишин А.П., Агеева А.С., Воронкова Е.В., Лукша В.И., Гукасян О.Н., Жарич В.М. Использование андрогенеза *in vitro* для вовлечения в селекцию межвидовых гибридов *Solanum tuberosum* L. с диким аллотетраплоидным видом картофеля *S. stoloniferum* Schltdl. et Bouché. *Биотехнология и селекция растений*. 2024;7(1):21-34. DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1-ol

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.

© Ермишин А.П., Агеева А.С., Воронкова Е.В., Лукша В.И., Гукасян О.Н., Жарич В.М., 2024

Original article

DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1-01

The use of *in vitro* androgenesis for the involvement of interspecific hybrids between *Solanum tuberosum* L. and wild allotetraploid potato species *Solanum stoloniferum* Schltdl. et Bouché into breeding

Alexander P. Yermishin, Anastasiya S. Ageeva, Elena V. Voronkova, Victoriya I. Luksha, Olga N. Gukasian, Victor M. Zharich

Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Corresponding author: Alexander P. Yermishin, ermishin@igc.by

Wild allotetraploid potato species Solanum stoloniferum Schltdl. & Bouché from Mexico is regarded as a valuable source of resistance genes for use in breeding. However, introgression of its resistance genes into breeding material is hampered by a set of reproductive barriers. The genomic difference between S. stoloniferum (genome AABB) and S. tuberosum L. (AAAA) is one of them. This makes questionable the possibility of transferring a variety of valuable genes of the wild species localized on the chromosomes of its genome B into the genome of cultivated potatoes. It is proposed to produce tetraploid (4x, AAAB) interspecific hybrids of S. stoloniferum, which are regarded as more promising for homoeological recombination than pentaploid (5x, AAAAB) hybrids commonly used in the introgression schemes. However, the effective ploidy of tetraploid hybrids (3EBN) hinders their backcrossing to cultivated potatoes (4 EBN). For instance, our attempts to involve the tetraploid hybrid of S. stoloniferum IGC16/36.1 obtained by us into hybridization with potato varieties were unsuccessful for a number of years. To solve this problem, we suggested a technique based on the production of 4x plants obtained in anther culture of this hybrid. The present research was aimed at assessing the efficiency of this approach. Thirty-one plants were obtained in anther culture (androgenic clones, androclones) of the hybrid IGC16/36.1 in 2018. Most of them exceeded the initial hybrid in habitus strength and flowering intensity. As a result of crosses made in 2019, 1039 hybrid seeds were obtained from crossing 21 androclones with the 'Lemhi Russet' variety (8.7 seeds/pollination), 1017 seeds (7.5 seeds/pollination) from crosses of 23 androclones with the 'Quarta' variety, and 716 seeds (12.3 seeds/pollination) from crosses of 11 androclones and a diploid potato line IGC 17n8 capable of producing fertile unreduced (2n) pollen. The hybrid seeds had good germination rate of 70-90%. Among the androclones that gave progeny in crosses with potato varieties, we identified genotypes carrying DNA markers of late blight (LB) resistance genes Rpi-sto1, R2 and R3b, PVY resistance genes Ry_{ado}, Ry_{sto} and Ry_{ch}, and potato wart disease resistance gene Sen2 (these markers were found in the initial accession of S. stoloniferum PI 205522 and in the IGC 16/36.1 hybrid). Despite the complex nature of inheritance of the analyzed markers in progenies of backcrosses of androclones, a number of isolated hybrids carried several markers, including those of the Rpi-stol, a broad-spectrum gene for high resistance to late blight. Hybrids with relatively high tuber productivity, features of cultivated potatoes such as regularly shaped tubers with small eyes, and high field resistance to late blight were selected. The prospects for using androclones of the tetraploid interspecific hybrid IGC 16/36.1 for increasing the frequency of homoeologous A/B recombination of chromosomes are discussed.

Keywords: interspecific hybridization, anther culture, gene introgression

Acknowledgments: the research was performed within the framework of the State research program "Biotechnologies" (2016–2020), Assignment 2.51 "Introgression of the genes of wild potato species *S. stoloniferum* into breeding material by means of *in vitro* androgenesis of interspecific hybrids"

For citation: Yermishin A.P., Ageeva A.C., Voronkova E.V., Luksha V.I., Gukasian O.N., Zharich V.M. The use of *in vitro* androgenesis for the involvement of interspecific hybrids between *Solanum tuberosum* L. and wild allotetraploid potato species *Solanum stoloniferum* Schltdl. et Bouché into breeding. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2024;7(1):21-34. (In Russ.). DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1-ol

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, and their employers.

© Yermishin A.P., Ageeva A.C., Voronkova E.V., Luksha V.I., Gukasian O.N., Zharich V.M., 2024

Введение

Дикий аллотетраплоидный вид картофеля из Мексики Solanum stoloniferum Schltdl. & Bouché рассматривают в качестве перспективного источника генов устойчивости к вирусам и фитофторозу. Однако интрогрессия генов устойчивости от S. stoloniferum в селекционный материал сильно затруднена из-за жестких межвидовых репродуктивных барьеров: односторонней несовместимости, постзиготной несовместимости (нарушения развития эндосперма гибридных семян), цитоплазматической мужской стерильности межвидовых гибридов (Yermishin et al., 2021).

Одним существенных ИЗ факторов, которые могут затруднять интрогрессию ценного генофонда S. stoloniferum (геномный состав AABB) в селекционный материал, являются геномные различия с культурным картофелем S. tuberosum L. (геномный состав AAAA) (Yermishin et al., 2021). Большинство методов вовлечения S. stoloniferum в селекцию основано на получении полиплоидных (чаще всего 6х) межвидовых гибридов и последующем их беккроссировании на культурный картофель (Swaminathan, 1951; Lamm, 1953; von Wangenheim, 1954; Camadro, Espinillo, 1991; Watanabe et al., 1992; Yermishin et al., 2017; Brown, 1988; Adiwilaga, Brown, 1991; Bamberg et al., 1994). Анализ мейоза 6х гибрида (AAAABB) и растений первого (ВС₁) и второго (ВС₂) поколений беккросса с помощью GISH (Genomic In Situ Hybridization) показал преимущественное спаривание гомологичных хромосом, отмечены лишь единичные случаи гомеологичной рекомбинации. В беккроссных поколениях хромосомы генома В были представлены в основном унивалентами (Gavrilenko et al., 2022). В связи с этим возникает вопрос о возможности интрогрессии генетического материала разных хромосом генома В мексиканского картофеля S. stoloniferum в геном культурного картофеля.

Для повышения вероятности спаривания хромосом геномов А и В нами предложено получать тетраплоидные межвидовые гибриды (АААВ), которые имеют геном В и геном А в непарном состоянии. Считается, что предпосылки для гомеологичной рекомбинации у таких гибридов выше, чем у пентаплоидных гибридов с геномным составом AAAAB (Adiwilaga, Brown, 1991; Bamberg, 1994; Spooner et al., 2008). Прямое подтверждение правомерности этого предположения получили Гавриленко с соавторами (Gavrilenko et al. 2015), которые выявили с помощью методов молекулярной цитогенетики образование до семи межгеномных бивалентов на клетку в мейозе у регенерантов (2x, AE) соматических гибридов S. tuberosum + S. etuberosum (4x, AAEE), полученных в результате андрогенеза, в то время как у исходных амфидиплоидов наблюдали преимущественное спаривание гомологичных хромосом геномов А и Е.

Тетраплоидные гибриды между аллотетраплоидными видами и культурным картофелем удалось получить благодаря большому объему скрещиваний и использованию

приема «двойного опыления» (rescue pollination) в сочетании с культурой *in vitro* незрелых зародышей или семян (Iwanaga et al., 1991; Watanabe et al., 1992; Janssen et al., 1997; Panahandeh et al., 2008). Эффективность гибридизации между аллотетраплоидными видами и сортами культурного картофеля очень низкая, прежде всего, из-за различий их эффективной плоидности (балансового числа эндосперма – EBN). Отмечена зависимость успеха гибридизации от генотипов использованных родительских форм и от условий окружающей среды при проведении скрещиваний. Тетраплоидные межвидовые гибриды имеют эффективную плоидность 3 EBN, что затрудняет их беккроссирование на культурный картофель (эффективная плоидность 4 EBN).

В Институте генетики и цитологии НАН Беларуси реализован ряд новых схем вовлечения в селекцию ценного генофонда S. stoloniferum (Yermishin et al., 2017; Antonova et al., 2019). В частности, использование в качестве посредника оригинальных диплоидных $S_{\nu}S_{\nu}$ линий (F₂ 2x S. tuberosum × S. verrucosum Schltdl.) позволило преодолеть одностороннюю несовместимость в скрещиваниях с S. stoloniferum и получить гексаплоидные межвидовые гибриды S_iS_i линия \times S_i stoloniferum, которые обладали мужской фертильностью в результате митотического удвоения хромосом триплоидных гибридов. Эти гексаплоидные гибриды были вовлечены в скрещивания с сортами культурного картофеля и фертильной диплоидной линией S. tuberosum IGC 10/1.21 [6x (2x S_yS_y линия \times S. stoloniferum PI 20522) × 2x S. tuberosum IGC 10/1.21], в результате чего были получены соответственно пентаплоидные (ААААВ) и один тетраплоидный гибрид IGC 16/36.1 (4x, 3 EBN, AAAB) первого поколения беккросса на культурный картофель.

Тетраплоидный гибрид IGC 16/36.1 (4x, 3 EBN, AAAB) представляет большой интерес для селекции, так как он несет ряд ценных генов дикого вида, прежде всего ген *Rpi-stol* высокой устойчивости к фитофторозу широкого спектра действия. Однако этот гибрид имел пониженную мужскую фертильность и не завязывал ягоды от самоопыления. Его в течение двух лет не удавалось вовлечь в гибридизацию с сортами культурного картофеля (Antonova et al., 2019).

Для решения данной проблемы нами использован методический прием, основанный на получении тетраплоидных растений-регенерантов (андрогенных клонов, андроклонов) в культуре пыльников гибрида IGC 16/36.1 и последующих скрещиваний их с сортами культурного картофеля. Предполагается, что в процессе микроспорогенеза происходит рекомбинация генетических факторов, контролирующих EBN, и появляется вероятность выщепления среди андроклонов индивидуальных растений с эффективной плоидностью, близкой к 4 EBN и, благодаря этому, способных скрещиваться с сортами культурного картофеля (Yermishin et al., 2008).

Целью настоящего исследования было оценить эффективность применения андрогенеза *in vitro* для повыше-

ния скрещиваемости межвидового гибрида IGC 16/36.1 (4x, 3 EBN, AAAB) с сортами культурного картофеля *S. tuberosum* (4x, 4 EBN, AAAA).

Материал и методы

В качестве материала использовали межвидовой гибрид IGC 16/36.1, [6x (2x S₂S₂ линия × S. stoloniferum PI 205522) × 2x S. tuberosum IGC 10/1.21], тридцать одно тетраплоидное растение-регенерант (андроклон), полученный в культуре пыльников IGC 16/36.1, и потомство от скрещивания гибрида и некоторых из андроклонов с сортами картофеля 'Lemhi Russet', 'Quarta' и диплоидной линией S. tuberosum IGC 17n8, формирующей фертильную диплоидную (2n) пыльцу (Yermishin et al., 2016). Проводили сравнение ряда селекционных показателей названных гибридов с показателями первого поколения беккросса на культурный картофель (линию IGC 17n8) гексаплоидных (2n=6x, AAAABB) межвидовых гибридов IGC 15/118.3.C6.2016 (2х $S_y S_y$ линия \times sto PI 205522) и IGC 15/114.52.C5.2017 (sto PI 205522 × 2x tbr IGC 10/1.21), полученных в результате митотического удвоения хромосом у соответствующих триплоидных гибридов.

Получение андроклонов IGC 16/36.1. Растения, доноры пыльников, выращивали в сосудах с почвой в боксовых теплицах в апреле-мае 2018 года. Использовали естественное освещение, поддерживали температуру 18-25°C днем и 15-18°C ночью. Растения, начиная с периода бутонизации, досвечивали в течение двух часов в сутки лампами ДРИ-2000-6, создающими освещенность 20 тыс. люкс. Для индукции каллюсообразования в культуре пыльников использовали питательную среду следующего состава: минеральные элементы и витамины по Nitsch (Nitsch, Nitsch, 1969), 6% сахарозы, 6-бензиламинопурин 5 мг/л, α-нафтилуксусная кислота 1 мг/л, мезоинозитол 100 мг/л. Кислотность среды – рН 5,8. Условия культивирования: температура 20-22°C под лампами дневного света (16 часов – день, 8 часов – ночь), освещенность 1000 люкс. Для получения растений-регенерантов образовавшиеся каллюсы переносили на питательную среду, содержащую минеральные элементы и витамины по Murashige, Skoog (Murashige, Skoog, 1962): 2% сахарозы, 1,5 мг/л бензиламинопурина, 0,5 мг/л α-нафтилуксусной кислоты, 0,5 мг/л зеатина. Кислотность среды - рН 5,8. Условия культивирования: температура 22°C днем, 18°C ночью. Описанная методика обеспечивает, как правило, получение андроклонов того же уровня плоидности, что и исходные растения (Yermishin et al., 2008). Важнейшим элементом технологии является выращивание растений-доноров пыльников с применением дополнительного освещения лампами дуговыми ртутными с иодидами металлов ДРИ-2000-6, что позволяет существенно повысить их способность к андрогенезу in vitro (Yermishin, 1998). Метод получения андроклонов был успешно использован для вовлечения в селекцию тетраплоидных соматических гибридов 2x S. tuberosum + S. bulbocastanum (Yermishin et al., 2008).

Гибридизация. Для проведения гибридизации растения родительских форм выращивали при естественном освещении в условиях закрытого грунта на биологической опытной станции Института генетики и цитологии НАН Беларуси (г. Минск). Клубни или рассаду с 5-6 настоящими листьями высаживали 15-20 мая. Схема посадки растений: расстояние между рядами 70 см, между растениями в ряду — 50 см. Условия окружающей среды в 2017-2019 годах были типичными для летнего периода в Беларуси. Для предотвращения самоопыления проводили кастрацию цветков материнских образцов на стадии нераскрывшихся окрашенных бутонов. Раскрывшиеся неопыленные цветки в соцветии удаляли.

Оценка продуктивности и признаков культурного картофеля у андроклонов и у их потомства, оценка полевой устойчивости андроклонов к фитофторозу. Пробирочные растения высаживали в горшочки (1 л) с торфогрунтом «Двина» и выращивали сначала в боксовой теплице при 20-25°C, затем переносили в условия открытого грунта на участок между теплицами, оборудованный устройством для полива. Семена гибридов замачивали одни сутки в растворе гиббереллина (100 мг/л), проращивали в плошках с торфогрунтом «Двина». Сеянцы пикировали в горшочки объёмом 1 л, наполненные таким же торфогрунтом «Двина», и выращивали в условиях открытого грунта как описано выше. По завершении вегетации учитывали показатели клубневой продуктивности: массу клубней, количество клубней с растения, среднюю массу клубня, а также признаки культурного картофеля: длину столонов, форму клубней, глубину глазков (в баллах от 1 до 9). Миниклубни андроклонов и их потомство от скрещивания с сортами, полученные соответственно в 2019 и 2020 годах, высаживали в поле.

Оценку полевой устойчивости к фитофторозу гибрида IGC 16/36.1 и его андроклонов осуществляли в 2020 году визуально в баллах (от 1 до 9), их беккроссного потомства - в 2021 году. В последнем случае учитывали степень поражения листовой поверхности растений (от 0 до 100%) три раза с интервалом в 7-10 дней, начиная с первого появления признаков поражения фитофторозом на восприимчивых к болезни сортах картофеля. По результатам наблюдений для каждого изучаемого образца рассчитывали показатель rADPC (relative area under the disease progress curve; Shaner, Finney, 1977; Fry, 1978). Место полевых испытаний гибридов (г. Минск, Беларусь) характеризуется ежегодными эпифитотиями фитофтороза: в годы испытаний отмечено сильное поражение патогеном восприимчивых сортов 'Уладар', 'Одиссей', 'Янка' и 'Лилея'.

ДНК-маркеры. У исходного образца S. stoloniferum PI 205522 и полученных на его основе межвидовых гибридов, в том числе IGC 16/36.1, были выявлены ДНК-маркеры ряда генов устойчивости к болезням картофеля. Это — маркеры 517/1519 $_{750}$, R2 $_{2500}$ и R3b $_{378}$ генов

устойчивости к фитофторозу Rpi-sto1, R2 и R3b соответственно (Wang et al., 2008; Kim et al., 2012; Rietman et al., 2012), маркеры RYSC3 $_{32l}$, Yes3- $3A_{34l}$ и RY364- 14_{298} генов устойчивости к PVY Ry_{adg} , Ry_{sto} и Ry_{chc} соответственно (Kasai et al., 2000; Song, Schwarzfischer, 2008; Mori et al., 2012), маркер 5450_{-3}_{1046} гена устойчивости к раку картофеля Sen2 (Plich et al., 2018), а также SCAR-маркер $SolB_{469}$, специфический для генома В аллотетраплоидных видов картофеля серии Longipedicillata Вuk. (Drobyazina, Khavkin, 2012). С целью изучения наследования этих генов у андроклонов и их беккроссного потомства на культурный картофель производили детекцию названных маркеров. Условия выделения и амплификации ДНК описаны ранее (Yermishin et al., 2023). Для определения характера расщепления гибридов по отдельным маркерам анализировали ДНК от 22-36 растений на комбинацию скрещивания.

Для оценки эффективности скрещиваний (семян/опыление — количество полученных гибридных семян/количество опыленных цветков) с тестерами исходного гибрида IGC 16/36.1 (контроль) и отдельных андроклонов, а также для оценки соответствия полученного расщепления по наличию ДНК-маркеров теоретически ожидаемому при различных вариантах скрещиваний, использовали метод «ү-квадрат».

Результаты

Характеристика гибрида IGC 16/36.1 и его андроклонов по показателям клубневой продуктивности и устойчивости к фитофторозу

По данным полевых испытаний межвидового гибрида IGC 16/36.1 и его андроклонов в 2020 году установлено, что названный гибрид и большинство андроклонов практически не поражались фитофторозом (устойчивость 8-9 баллов). Устойчивость исходного гибрида по результатам оценки составила восемь баллов. Тринадцать из 31 андроклона не имели признаков поражения фитофторозом (устойчивость 9 баллов).

Исходный межвидовой гибрид обладал слабым клубнеобразованием и имел длинные столоны, что объясняется присутствием у него значительной доли генома дикого вида. Три андроклона не образовали клубней, а один из андроклонов (IGC 16/36.1.5) отличался слабым ростом и сформировал лишь один мелкий клубень. Остальные андроклоны заметно превосходили исходный межвидовой гибрид по интенсивности роста и клубнеобразованию. Клубни у всех андроклонов имели правильную форму, часть из них были способны формировать относительно крупные клубни с мелкими глазками. Однако все андроклоны имели длинные столоны.

Беккроссирование межвидового гибрида IGC 16/36.1 и его андроклонов на культурный картофель

В 2019 году были проведены скрещивания тетраплоидного межвидового гибрида IGC 16/36.1 и его андроклонов с тестерами – сортами картофеля 'Lemhi Russet', 'Quarta' и формирующей нередуцированную диплоидную (2n) пыльцу диплоидной линией IGC 17n8. Попытки вовлечь IGC 16/36.1 в гибридизацию с сортами в 2017 и 2018 годах, а также получить ягоды от его самоопыления, были неудачными.

В 2019 году, в благоприятных для гибридизации картофеля условиях окружающей среды, IGC 16/36.1 удалось скрестить с картофелем сорта 'Quarta' и линией IGC 17n8, но ягоды от самоопыления гибрид IGC 16/36.1 не завязал. Большинство андроклонов заметно превосходили IGC 16/36.1 по интенсивности цветения. Двадцать шесть андроклонов из 31 завязали ягоды в результате самоопыления, что говорит о более высокой функциональной фертильности их пыльцы по сравнению с исходным гибридом.

В результате скрещиваний 21 андроклона с сортом 'Lemhi Russet' получено 68 ягод с семенами (1039 семян; 8,7 семян/опыление), 23 андроклона с сортом 'Quarta' – 66 ягод (1017 семян; 7,5 семян/опыление), 11 андроклонов с линией IGC 17n8 – 33 ягоды (716 семян; 12,3 семян/опыление). Не удалось вовлечь в гибридизацию с сортами только три андроклона: IGC 16/36.1.2, IGC 16/36.1.16 и IGC 16/36.1.17. Ряд андроклонов достоверно превосходили исходный гибрид по эффективности гибридизации с тестерами (таблица 1).

По результатам гибридизации с сортами-тестерами и наличию ДНК-маркеров генов устойчивости к PVY и фитофторозу, прежде всего, маркера 517/1519₇₅₀ гена *Rpistol*, для дальнейшего анализа интрогрессии соответствующих генов в геном культурного картофеля в процессе беккроссирования межвидового гибрида были отобраны андроклоны IGC 16/36.1.1, IGC 16/36.1.8, IGC 16/36.1.9, IGC 16/36.1.13, IGC 16/36.1.18 и IGC 16/36.1.25, имевшие высокие показатели клубнеобразования и полевой устойчивости к фитофторозу, и с участием которых получено достаточное для анализа количество гибридных семян.

Показатели всхожести семян гибридов от скрещивания межвидового гибрида IGC 16/36.1 и его андроклонов с сортами картофеля

В таблице 2 представлены данные по всхожести гибридных семян и количеству высаженных в грунт сеянцев. Как видно из таблицы, гибридные семена от скрещивания гибрида IGC 16/36.1 с сортами имели высокую всхожесть (более 90%), которая существенно превосходила показатели всхожести семян гибридов, полученных с участием исходного гексаплоидного гибрида IGC15/118.3.C6.2016 (*S*,*S*, линия × sto PI 205522); послед-

ний составил 18%. Аналогичный гексаплоидный гибрид, при получении которого дикий вид был использован в качестве материнской формы, 6х (sto PI 205522 × tbr 10/1.21), давал гибридные семена с высокой всхожестью (83%). В большинстве комбинаций скрещивания андроклонов с сортами и линией IGC 17n8 отмечена относительно высокая всхожесть гибридных семян (70-90%). Пониженная всхожесть наблюдалась в случае семян, полученных в результате самоопыления отдельных андроклонов (IGC 16/36.1.1, IGC 16/36.1.25). Таким образом, использование в скрещиваниях с сортами картофеля андроклонов тетраплоидного межвидового гибрида IGC 16/36.1 позволяет в большинстве случаев получить гибридные семена, обладающие высокой всхожестью.

Показатели клубневой продуктивности и признаки культурного картофеля у сеянцев от беккросса на культурный картофель межвидового гибрида IGC 16/36.1 и его андроклонов

В процессе интрогрессии ценных генов дикого вида в селекционный материал большое значение имеет то, насколько быстро удается элиминировать нежелательные признаки дикого вида. В случае гибридов с S. stoloniferum к нежелательным признакам дикого вида относят низ-

кую клубневую продуктивность (вплоть до отсутствия клубнеобразования в условиях умеренных широт), очень длинные и ветвистые столоны, клубни неправильной формы с глубокими глазками.

Как видно из таблицы 3, эффективность окультуривания беккроссного потомства тетраплоидного межвидового гибрида IGC 16/36.1 и его андроклонов заметно выше по сравнению с беккроссом гексаплоидных межвидовых гибридов (две последние строки). Это выражается в более высокой клубневой продуктивности потомства, более низкой доле сеянцев, не сформировавших клубни, и заметно большей частоте гибридов с клубнями, имеющими глазки средней глубины и мелкие глазки. Такую ситуацию несложно объяснить тем, что гибрид IGC 16/36.1 представляет собой первое поколение от беккросса (BC₁) межвидового гибрида 6х (S_1S_2 линия \times sto PI 205522) на культурный картофель. Однако важно отметить, что с практической точки зрения уже во втором поколении BC₂ от возвратных скрещиваний IGC 16/36.1 имеется возможность отбирать весьма продуктивные сеянцы с комплексом признаков культурного картофеля, что для межвидовой гибридизации картофеля является редким явлением. По результатам оценки 365 гибридных сеянцев было отобрано 95 (26%) с лучшими показателями признаков культурного картофеля для последующих испытаний в полевых условиях.

Таблица 1. Результаты скрещиваний межвидового гибрида IGC 16/36.1 и его андроклонов с тестерами Table 1. Results of crossing the interspecific hybrid IGC 16/36.1 and its androgenic clones with testers

						Опылите	Опылители/ Pollinators	ators				
1		'Lemhi	'Lemhi Russet') 16C	IGC 17n8			nÒ,	Quarta'	
Материнские формы/ Female forms	Опылений, число/ Pollinations, number	Ягод, число/ Berries, number	Семян, число/ Seeds, number	Семян на опыление, число/ Seeds per pollination, number	Опылений, число/ Pollinations, number	Ягод, число/ Berries, number	Семян, число/ Seeds, number	Семян на опыление, число/ Seeds per pollination, number	Опылений, число/ Pollinations, number	Ягод, число/ Berries, number	Семян, число/ Seeds, number	Семян на опыление, число/ Seeds per pollination, number
IGC 16/36.1					7	-	33	4,7	4	1	24	6,0
IGC 16/36.1.1 ¹	7	S	06	12,9	1	1		1	3	0	0	0
IGC 16/36.1.3	7	2	15	2,1	4	Э	23	5,8	1	1	ı	ı
IGC 16/36.1.4	2	-	0	0	2	-	16	8,0	1	ı	ı	1
IGC 16/36.1.5	9	S	115	19,2	4	2	31	7,8	4	2	64	16,0
IGC 16/36.1.6	3	-	12	4,0	1		1	ı	3	2	41	13,7
IGC 16/36.1.7	8	3	54	8,9	4	2	4	11,0	3	2	43	14,3
IGC 16/36.1.8	5	3	<i>L</i> 9	13,4	4	2	19	4,8	6	4	70	7,8
IGC 16/36.1.9	3	2	0	0	1		1	ı	7	2	37	5,3
IGC 16/36.1.10	4	4	44	11,0	1		1	ı	3	3	40	13,3
IGC 16/36.1.11	4	4	36	0,6	-		1	-	2	1	0	0
IGC 16/36.1.12	4	3	22	5,5	1		1	ı	9	5	54	9,0
IGC 16/36.1.13	5	5	101	20,2	7	9	149	21,3**	7	9	72	10,3
IGC 16/36.1.14	5	0	0	0	1	-	-	ı	7	1	10	1,4
IGC 16/36.1.15	8	5	103	12,9	-		1	-	7	3	54	7,7
IGC 16/36.1.18	6	8	109	12,1	1		1	ı	1	0	0	0
IGC 16/36.1.19	4	4	57	14,3	1		1	ı	4	3	65	14,8
IGC 16/36.1.20	1	0	0	0	1		1	ı	8	4	09	7,5
IGC 16/36.1.21	3	2	59	7,6	1		1	-	7	1	8	1,1
IGC 16/36.1.22	1	1	56	29,0	6	9	112	12,4	6	7	611	13,2
IGC 16/36.1.23	-	-		-	4	3	68	22,3**	4	1	0	0
IGC 16/36.1.24	3	0	0	0	9	1	31	5,2	8	3	20	2,5
IGC 16/36.1.25	1	1	13	13,0	1	-	-	ı	7	9	122	17,4
IGC 16/36.1.26	8	8	130	16,3	-		1	-	10	5	43	4,3
IGC 16/36.1.27	-	-		-	-	-	-	-	5	1	11	2,2
IGC 16/36.1.28	-			1	-	-	-	-	3	1	18	6,0
IGC 16/36.1.29	-			1	10	9	179	17,9**	4	2	63	15,8
IGC 16/36.1.30	1	1	-	1	4	1	23	5,8	1	0	0	0
IGC 16/36.1.31	3	-	13	4,3	ı	1		1	2	1	6	4,5
Итого по андроклонам:	120	89	1039	8,7	58	33	716	12,3*	136	99	1017	7,5
*												

'Эдесь и ниже в столбце перечислены андроклоны гибрида ІGC 16/36.1 (последняя цифра — номер андроклона). $*P \ge 0,05; \ **P \ge 0,01$

Таблица 2. Показатели всхожести семян от скрещивания межвидового гибрида IGC 16/36.1 и его андрогенных клонов с тестерами; семян от самоопыления андрогенных клонов

Table 2. Germination of seeds from crosses between the interspecific hybrid IGC 16/36.1 and its androgenic clones and testers; seeds from self-pollination of androgenic clones

Комбинация скрещивания/ Cross combination	Посажено семян, число/Planted seeds, number	Проросших семян, число/ Germinated seeds, number	Всхожесть семян, %/ Seed germination rate,%
16/36.1 × 'Quarta'	24	22	91,7
16/36.1 × IGC 17n8	33	30	90,9
16/36.1.6 × 'Quarta'	41	34	82,9
16/36.1.9 × 'Quarta'	37	31	83,8
16/36.1.13 × 'Quarta'	50	38	76,0
16/36.1.25 × 'Quarta'	50	41	82,0
16/36.1.1 × 'Lemhi Russet'	50	42	84,0
16/36.1.8 × 'Lemhi Russet'	50	35	70,0
16/36.1.13 × 'Lemhi Russet'	50	33	66,0
16/36.1.18 'Lemhi Russet'	50	33	66,0
16/36.1.13 × IGC 17n8	50	46	92,0
16/36.1.1 (св.оп.*)	22	4	18,2
16/36.1.6 (св.оп.)	35	23	65,7
16/36.1.8 (св.оп.)	39	25	64,1
16/36.1.9 (св.оп.)	28	16	57,1
16/36.1.13 (св.оп.)	62	46	74,2
16/36.1.18 (св.оп.)	83	42	50,6
16/36.1.25 (св.оп.)	12	4	33,3
IGC 15/118.3.C6.2016 [6x (205522 × 10/1.21)] × 17n8	100	83	83,0
IGC 15/114.52.C5.2017 [6x (S _v S _v × 205522)] × 17n8	100	18	18,0

^{* –} неконтролируемое свободное опыление

Полевая устойчивость к фитофторозу сеянцев от беккросса на культурный картофель межвидового гибрида IGC 16/36.1. и его андроклонов

Представленные в таблице 4 результаты оценки полевой устойчивости к фитофторозу первой клубневой репродукции беккросса IGC 16/36.1 и его андроклонов свидетельствуют об их относительно высокой устойчивости к патогену. Их значения гАDPC не имели достоверных отличий от соответствующих показателей гибридов контрольных популяций 6х ($S_{\nu}S_{\nu}$ линия × sto PI 205522) × IGC 17n8 и 6х (sto PI 205522 × IGC tbr 10/1.21) × IGC 17n8, для которых характерна высокая долговре-

менная устойчивость к фитофторозу, поскольку все они являются носителями гена *Rpi-sto1*. Важно отметить, что среди гибридов от беккросса IGC 16/36.1 и его андроклонов на культурный картофель выделено 16 гибридов, не имеющих признаков поражения фитофторозом (устойчивость 9 баллов), обладающих относительно высокой клубневой продуктивностью и комплексом признаков культурного картофеля. Несмотря на выявленную вариацию гАDPC потомства отдельных андроклонов и эффективность отбора устойчивых к фитофторозу гибридов между собой и относительно беккроссного потомства исходного гибрида IGC 16/36.1, достоверных различий между ними не выявлено. Одной из причин этого мог быть небольшой объем выборки изучаемых гибридов.

Таблица 3. Показатели клубневой продуктивности и признаки культурного картофеля у сеянцев, полученных от беккросса межвидового гибрида IGC 16/36.1 и его андрогенных клонов на культурный картофель (Минск, 2020) Table 3. Tuber productivity and the characters of cultivated potatoes in seedlings of backcross progeny of the interspecific hybrid IGC 16/36.1 and its androgenic clones to cultivated potatoes (Minsk, 2020)

Комбинация скрещивания/ Cross combination	Масса клубней с растения, г/ Weight of tubers per plant, g	Количество клубней с растения/ Number of tubers per plant	Средняя масса клубня, г/ Average tuber weight, g	Максимальное значение массы клубней с растения, г/ Maximal tuber weight per plant, g	Сеянцев, не образовавших клубни, %/ Seedlings without tuber formation, %/	Глубина глазков клубней, ,баллы/ Depth of tuber eyes, points	Сеянцев с мелкими глазками клубней (9 баллов), %/ Seedlings with small tuber eyes (9 points) , %
16/36.1 × 'Quarta'	24,4±0,3	3,3±0,4	7,1±0,01	79,5	8,4	5,9±0,6	30,0
$16/36.1 \times 17n8$	34,1±0,2	3,8±0,5	10,2±0,01	152,1	6,7	6,9±0,4	42,9
16/36.1.6 × 'Quarta'	$16,2\pm 2,8$	3,3±0,4	$4,8\pm 0,68$	5,69	6,5	$7,1\pm0,4$	51,7
16/36.1.9 × 'Quarta'	27,7±0,2	3,5±0,5	7,7±0,01	6,76	13,3	$8,1\pm0,3$	63,0
16/36.1.13 × 'Quarta'	29,1±5,7	2,6±0,4	9,8±1,69	82,4	15,6	6,5±0,5	40,0
16/36.1.25 × 'Quarta'	27,9±0,3	2,4±0,4	$12,1\pm0,01$	101,6	25,0	7,4±0,3	52,0
$16/36.1.1 \times \text{Lemhi Russet}$	37,0±0,5	$3,1\pm0,4$	$9,6\pm0,01$	180,5	0,61	$7,1\pm 0,4$	55,9
$16/36.1.8 \times \text{ 'Lemhi Russet'}$	$22,1\pm0,3$	2,3±0,3	$7,8\pm 0,01$	81,8	18,8	7,3±0,4	53,9
16/36.1.13 × 'Lemhi Russet'	29,1±4,5	2,6±0,4	9,8±1,28	82,4	15,6	7,5±0,3	54,2
16/36.1.18 × 'Lemhi Russet'	35,1±0,4	2,7±0,4	$11,1\pm0,01$	129,9	19,4	6,9±0,4	41,7
$16/36.1.13 \times 17n8$	$29,1\pm0,2$	2,6±0,3	$9,8\pm0,01$	82,4	15,6	7,6±0,3	57,9
$6x (S_{y}S_{y} \times PI205522) \times 17n8$	$13,1\pm0,2$	3,6±0,3	$3,5\pm0,01$	33,2	0	5,3±0,5	11,1
$6x (PI205522 \times 10/1.21) \times 17n8$	$21,7\pm 3,6$	2,5±0,3	6,4±0,79	75,7	18,7	$5,1\pm0,5$	19,2

Таблица 4. Полевая устойчивость к фитофторозу поколения от беккросса на культурный картофель межвидового гибрида IGC 16/36.1 и его андрогенных клонов (первая клубневая репродукция, Минск, 2021)

Table 4. Late blight field resistance in a progeny from backcrossing the interspecific hybrid IGC 16/36.1 and its androgenic clones to cultivated potatoes (the first tuber reproduction, Minsk, 2021)

Комбинация скрещивания/ Cross combination	Количество гибридов, число/ Number of hybrids	Гибридов без симптомов поражения фитофторозом, число/ Hybrids without disease symptoms, number	Эффективность отбора по устойчивости к фитофторозу, % Efficiency of selection for LB resistance, %	rADPC
16/36.1 × 'Quarta'	5	5	100	$0,150\pm0,000$
16/36.1 × 17n8	25	4	16,0	$0,078\pm0,016$
16/36.1.9 × 'Quarta'	12	3	25,0	$0,058\pm0,018$
16/36.1.13 × 'Quarta'	3	1	33,3	$0,092\pm0,081$
16/36.1.25 × 'Quarta'	8	5	62,5	$0,031\pm0,016$
16/36.1.1 × 'Lemhi Russet'	5	1	20,0	$0,042\pm0,024$
16/36.1.8 × 'Lemhi Russet'	5	0	0	0,031±0,003
16/36.1.13 × 'Lemhi Russet'	4	1	25,0	0,055±0,038
16/36.1.18 × 'Lemhi Russet'	23	1	4,4	$0,094\pm0,026$
16/36.1.13 × 17n8	5	0	0	0,222±0,073
Итого:	95	21	22,1	
	Контрольные	популяции гибридов		
$6x (S_{y}S_{y} \times PI205522) \times 17n8$	2	0	0	0,014±0,009
6x (PI205522 × 10/1.21) × 17n8	12	6	50	$0,019\pm0,009$

Наследование ДНК-маркеров генов устойчивости к болезням S. stoloniferum PI 205522 гибридами от беккросса на культурный картофель межвидового гибрида IGC 16/36.1. и его андроклонов

Как видно из таблицы 5, характер наследования маркеров в потомстве от беккросса IGC 16/36.1 на культурный картофель в большинстве случаев соответствовал тому, что наблюдают в результате анализирующих скрещиваний сортов картофеля, которые являются симплексами по отдельным генам устойчивости, с тестерами-нуллиплексами (расщепление 1:1) (Yermishin et al., 2016). При этом в отдельных случаях имел место избыток гибридов-носителей рецессивных (Rpi-sto1, Ry che) или доминантных аллелей (R3b). Однако отличие от ожидаемого расщепления было статистически недостоверным. Расщепление гибридов по маркерам, которые были представлены как у IGC 16/36.1, так и у тестеров, существенно отличалось. По маркеру гена Sen2 оно соответствовало 3:1 (χ^2 =0,52; $\chi^2_{0.05}$ =3,84), что характерно для гибридов между симплексами по соответствующим генам, а по маркеру гена Ry_{adg} расщепление отсутствовало. Также отмечено отсутствие расщепления по маркеру гена R2, несмотря на то, что у тестера IGC 17n8 этот маркер выявлен не был.

Характер наследования маркеров в потомстве от беккросса на культурный картофель у большинства

андроклонов аналогичен описанному для потомства IGC 16/36.1. Однако в ряде случаев отмечены существенные различия. В частности, это касается наследования маркера гена R2 у гибридов IGC 16/36.1.13 × IGC 17n8 и IGC 16/36.1.18 × 'Lemhi Russet', маркера гена R3b у гибридов IGC 16/36.1.1 × 'Lemhi Russet', маркера гена $Ry_{\rm adg}$ у гибридов IGC 16/36.1.13 × IGC 17n8 и маркера гена $Ry_{\rm sto}$ у гибридов IGC 16/36.1.1 × 'Lemhi Russet' и IGC 16/36.1.18 × 'Lemhi Russet'.

Обсуждение

Результаты настоящего исследования показали, что использование метода культуры пыльников в случае тетраплоидного (3 EBN, AAAB) межвидового гибрида IGC 16/36.1 дало возможность получить тетраплоидные растения-регенеранты (андроклоны), несущие унаследованные от него гены устойчивости к болезням и способные скрещиваться с сортами культурного картофеля. В результате получен исходный материал, представляющий значительный интерес для селекции.

Ранее метод культуры пыльников был успешно использован для вовлечения в селекцию тетраплоидных соматических гибридов между дигаплоидами *S. tuberosum* и диким диплоидным видом картофеля *S. bulbocastanum* (3 EBN, AABB), которые до этого не удавалось вовлечь в возвратные скрещивания с культурным картофелем (Yermishin et al., 2008).

Таблица 5. Наличие ДНК-маркеров генов устойчивости и маркера SolB₄₆₉ генома В у гибрида IGC 16/36.1 и его андрогенных клонов, и наследование маркеров в потомстве от их беккросса на культурный картофель

Table 5. Presence of resistance gene markers and B genome marker SolB₄₆₉ in IGC 16/36.1 hybrid and its androgenic clones, and markers inheritance by progenies from their backcrossing to cultivated potatoes

Гибриды, андрогенные клоны,			,	ДНК-марке	ры/ DNA ma	rkers		
тестеры/ Hybrids, androgenic clones, testers	517-1519 ₇₅₀	R2 ₂₅₀₀	R3b ₃₇₈	RYSC ₃₂₁	Yes3-3A ₃₄₁	RY364-14 ₂₉₈	5450_3 ₁₀₄₆	SolB ₄₆₉
IGC 16/36.1	1*	1	1	1	1	1	1	1
AK IGC 16/36.1.1	1	1	1	1	1	1	1	1
AK IGC 16/36.1.13	1	1	1	1	1	1	1	1
AK IGC 16/36.1.18	1	1	1	1	1	1	1	1
IGC 17n8	0	0	0	1	0	0	1	0
'Lemhi Russet'	0	0	0	1	0	0	1	0
IGC 16/36.1 × IGC 17n8	8:15**	23:0	15:8	23:0	12:11	7:16	18:5	10:13
IGC 16/36.1.13 × IGC 17n8	10:26	14:220.01	16:20	19:170.01	24:12	10:26	27:9	11:25
IGC 16/36.1.1 × 'Lemhi Russet'	13:20	30:3	31:20.01	32:1	28:50.01	16:17	30:3	16:17
IGC 16/36.1.18 × 'Lemhi Russet'	10:12	16:60.01	19:3	21:1	18:40.05	8:14	20:1	10:12

^{*1} — маркер представлен, 0 — маркер отсутствует

Тетраплоидные растения-регенеранты соматических гибридов были способны, в отличие от исходных гибридов, к успешному опылению гаплопродюсером IvP 35 (S. phureja Juz. & Bukasov), а полученный дигаплоид – к гибридизации с фертильными диплоидными клонами S. tuberosum.

Как видно из таблицы 5, в анализ наследования маркеров генов устойчивости к болезням беккроссным потомством были включены андроклоны, сохранившие все ДНК-маркеры, представленные у исходного межвидового гибрида. Это можно объяснить следующим образом. Использованная методика культуры пыльников обеспечивает, как правило, получение андроклонов того же уровня плоидности, что и исходные растения. Во-первых, это может быть результатом удвоения числа хромосом в процессе культивирования каллюсных культур, происходящих от гаплоидных микроспор пыльников, и регенерации растений. Во-вторых, такого типа растения-регенеранты могут быть получены из каллюсных клеток, ведущих свое происхождение от микроспор с нередуцированным (2n) числом хромосом. В-третьих, не исключен вариант происхождения андроклонов от соматических клеток пыльника или остатков тычиночной нити. Принимая во внимание наличие заметных различий между андроклонами и исходным гибридом по морфологическим признакам, фертильности и скрещиваемости с тестерами, наиболее вероятным представляется второй вариант, то есть развитие андроклонов из нередуцированных микроспор.

В пользу этого вывода говорят также представлен-

ные в таблице 5 различия в характере наследования маркеров потомством отдельных андроклонов по сравнению с потомством исходного межвидового гибрида. Анализируя эти результаты, следует иметь в виду, что генетическая структура тетраплоидного межвидового гибрида IGC 16/36.1 (геномный состав AAAB) существенно отличается от геномного состава культурного картофеля (АААА). Присутствие у него в непарном состоянии одного из геномов А и генома В дикого вида, может приводить к существенным нарушениям спаривания принадлежащих им хромосом и рекомбинации между ними (Gavrilenko et al., 2022). Следствием этого могут быть, с одной стороны, существенные различия в характере наследования маркеров IGC 16/36.1 и его андроклонов по сравнению с тем, что имеет место в скрещиваниях между сортами культурного картофеля. С другой стороны, это же может привести к формированию необычного состава хромосом у андроклонов IGC 16/36.1 и более сложному характеру наследования их маркеров по сравнению с исходным гибридом. В частности, беккроссное потомство IGC 16/36.1 может наследовать наряду с обычными рекомбинантными хромосомами генома А также рекомбинантные хромосомы А/В и разное количество интактных (не участвовавших в спаривании) хромосом геномов А и В. Аналогичный состав могут иметь андроклоны и их потомство. Дополнительную генетическую вариацию при формировании геномов андроклонов может вносить изменчивость, связанная с культивированием каллюсных клеток, а также с отбором клеток, способных дать начало

^{**}Гибриды с маркером: гибриды без маркера

^{0.05}Расщепление достоверно отличается от контроля – IGC 16/36.1 × IGC 17n8 (P≤0,05, $\chi^2_{0.05}$ = 3,84) ^{0.01}Расщепление достоверно отличается от контроля – IGC 16/36.1 × IGC 17n8 (P≤0,01, $\chi^2_{0.01}$ = 6,63)

растениям-регенерантам.

Важным фактором, который может оказывать влияние на характер наследования маркеров, может быть их расположение в геномах А или В дикого вида (и, соответственно, получившего их межвидового гибрида). Согласно выводам, сделанным в нашей недавней публикации (Yermishin et al. 2023), все анализируемые маркеры S. stoloniferum PI 205522, за исключением маркера RY364-14 $_{298}$ гена $Ry_{\rm chc}$, локализованы в геноме В дикого вида. Как видно из таблицы 5, в потомстве исходного гибрида IGC 16/36.1 отмечено расщепление по маркеру гена Ry_{chc} , расположенному в геноме A, не отличающееся достоверно от 1:1, что характерно для скрещивания тетраплоидов культурного картофеля, являющихся симплексами по соответствующим генам, с нуллиплексами. Аналогичное расщепление выявлено по маркеру SolB₄₆₉, а также по маркерам генов Rpi-stol, R3b, $Ry_{sto.}$ локализованным в геноме В. Однако такой характер наследования этих маркеров может быть связан со случайной передачей потомству соответствующих хромосом генома В гибрида IGC 16/36.1, не вступивших в синапсис с хромосомами генома А, а также рекомбинантных А/В хромосом, несущих эти маркеры. По маркеру гена $Ry_{\rm adg}$ отмечено отсутствие расщепления в потомстве гибрида IGC 16/36.1: все потомки имели этот маркер. Это может быть отчасти связано с наличием маркера гена $Ry_{\rm adg}$ у тестера — линии IGC 17n8, а также с повышенной частотой передачи потомству хромосом генома В от IGC 16/36.1 или рекомбинантных А/В хромосом, несущих этот маркер. Аналогичное расщепление в потомстве IGC 16/36.1 по маркеру гена R2 можно объяснить только второй из названных причин. Что касается расщепления гибридов IGC 16/36.1 и его андроклонов по маркеру гена Sen2, то оно соответствовало 3:1, и это характерно для гибридизации между сортами-симплексами. Следует заметить, что мы не исключали возможность локализации этого гена в геноме А мексиканского картофеля S. stoloniferum PI 205522 (Yermishin et al. 2023). В таком случае его наследование беккроссным потомством межвидового гибрида и его андроклонов, как и в случае маркера гена $Ry_{\rm chc}$, не должно отличаться от того, что наблюдают в скрещиваниях между сортами культурного картофеля.

Намерение вовлечь в селекцию межвидовой гибрид IGC 16/36.1 во многом продиктовано тем, что, как отмечалось выше, его использование может повысить вероятность интрогрессии в геном культурного картофеля ценных генов *S. stoloniferum*, расположенных в геноме В. Однако данные, полученные при изучении мексиканского картофеля, говорят о том, что его применение для целей интрогрессии генов может быть недостаточно эффективным из-за его низкой скрещиваемости с сортами культурного картофеля (Antonova et al., 2019; Yermishin et al., 2023) и невысокой частоты образования рекомбинантных А/В хромосом в процессе беккросирования тех гибридов, которые удалось получить (Gavrilenko et al., 2022). Также установлено, что одним из возможных путей преодоле-

ния постзиготной несовместимости гибрида IGC 16/36.1 в скрещиваниях с сортами культурного картофеля является образование яйцеклеток с полным набором из 12 хромосом непарного генома А и, вследствие этого, имеющих 2 EBN. В результате оплодотворения таких яйцеклеток пыльцой сортов картофеля с 2 EBN происходит образование жизнеспособных семян (с 24 хромосомами генома А). Полученные гибриды существенно не отличаются по составу хромосом от аналогичных гибридов, полученных с использованием традиционных схем интрогрессии (Gavrilenko et al., 2022; Yermishin et al., 2023).

Использование андроклонов IGC 16/36.1 может исправить ситуацию. Как видно из результатов настоящего исследования, некоторые андроклоны достоверно превосходили исходный межвидовой гибрид по эффективности скрещиваний с сортами S. tuberosum и были способны завязывать семена, обладающие высокой всхожестью. Следовательно, эффективная плоидность таких андроклонов близка к 4 EBN. Появление описанных выше гибридов от беккросса IGC 16/36.1 маловероятно. Кроме того, многие андроклоны, в отличие от IGC 16/36.1, были способны формировать функционально фертильную пыльцу, что делает возможным получение потомства от их самоопыления. Следовательно, их гаметы генетически более сбалансированы, чем гаметы исходного гибрида. Важно отметить, что появлению андроклонов с описанными выше свойствами предшествовало мейотическое деление материнских клеток пыльцы, образование каллюса из микроспор и отбор каллюсных клеток, способных давать начало растениям-регенерантам. Есть основание полагать, что эти факторы способны оказывать влияние на процесс гомеологичной рекомбинации хромосом межвидового гибрида и таким образом повысить вероятность интрогрессии в геном культурного картофеля ценных генов дикого вида, локализованных в его геноме В. Дальнейшие исследования призваны подтвердить или опровергнуть это предположение.

Заключение

Таким образом, использование предложенного метода культуры пыльников позволило получить андроклоны тетраплоидного (3 EBN, AAAB) межвидового гибрида IGC 16/36.1, несущие гены устойчивости к болезням и способные скрещиваться с сортами культурного картофеля. Это обеспечило перенос беккроссному потомству ряда ценных для селекции генов *S. stoloniferum* PI 205522, несмотря на сложный характер их наследования. В результате получен исходный материал, представляющий значительный интерес для селекции. В частности, отобран ряд гибридов с комплексом признаков культурного картофеля, обладающих высокой полевой устойчивостью к фитофторозу и являющихся носителями гена *Rpi-stol* высокой устойчивости к фитофторозу широкого спектра действия.

References/Литература

- Adiwilaga K.D., Brown C.R. Use of 2n pollen-producing triploid hybrids to introduce tetraploid Mexican wild species germplasm to cultivated tetraploid potato gene pool. *Theoretical and Applied Genetics*. 1991;81(5):645-652. DOI: 10.1007/BF00226732
- Antonova O.Yu., Yermishin A.P., Levy A.V., Ageeva A.S., Voronkova E.V., Gavrilenko T.A. Development of chromosome-specific markers for a study on introgressive hybridization of potato with the wild Mexican allotetraploid species Solanum stoloniferum Schltdl. Plant Biotechnology and Breeding. 2019;2(4):24-35. [in Russian] (Антонова О.Ю., Ермишин А.П., Левый А.В., Агеева А.С., Воронкова Е.В. Гавриленко Т.А. Разработка хромосомо-специфичных ДНК-маркеров для изучения интрогрессивной гибридизации картофеля с диким мексиканским аллотетраплоидным видом Solanum stoloniferum Schltdl. Биотехнология и селекция растений. 2019;2(4):24-35). DOI: 10.30901/2658-6266-2019-4-03
- Bamberg J.B. Allelism of endosperm balance number (EBN) in *Solanum acaule* Bitt. and other wild potato species. *Theoretical and Applied Genetics*. 1994;89(6):682-686. DOI: 10.1007/BF00223705
- Bamberg J.B., Hanneman R.E. Jr, Palta J.P., Harbage J.F. Using disomic 4x (2EBN) potato species germplasm via bridge species *Solanum commersonii*. *Genome*. 1994:37(5):866-870. DOI: 10.1139/g94-122
- Brown C.R. Characteristics of 2n pollen producing triploid hybrids between *Solanum stoloniferum* and cultivated diploid potatoes. *American Potato Journal*. 1988;65(2):75-84. DOI: 10.1007/BF02867455
- Camadro E.L., Espinillo J.C. Germplasm transfer from the wild tetraploid species *Solanum acaule* Bitt. to the cultivated potato, *S. tuberosum* L. using 2n eggs. *American Journal of Potato Research*. 1991;67(11):737-749. DOI: 10.1007/BF03044524
- Drobyazina P.E., Khavkin E.E. FLORICAULA/LEAFY intron 2-based markers of wild *Solanum* species and genomes for introgression breeding. In: H.T.A.M. Schepers (ed.). *PPO-Special Report no. 15*. Wageningen: DLO Foundation; 2012. p.187-192.
- Fry W.E. Quantification of general resistance of potato cultivars and fungicide effects for integrated control of potato late blight. *Phytopathology.* 1978;68:1650-1655. DOI: 10.1094/Phyto-68-1650
- Gavrilenko T.A., Pendinen G.I., Rokka V.-M. Antonova O.Y. Thieme R. Homeologous chromosome pairing in distant allohaploid hybrids of the genus *Solanum. Russian Journal of Genetics: Applied Research.* 2015;5(3):182-190. DOI: 10.1134/S2079059715030065
- Gavrilenko T.A., Pendinen G.I., Yermishin A.P. GISH analysis of the introgression of the B subgenome genetic material of wild allotetraploid species *Solanum stoloniferum* into backcrossing progenies with potato. *Agronomy*. 2022;12(4):787. DOI: 10.3390/ agronomy12040787
- Iwanaga M., Freyre R., Watanabe K. Breaking of the crossability barriers between disomic tetraploid *Solanum acaule* and tetrasomic tetraploid *S. tuberosum. Euphytica*. 1991;52(3):183-191. DOI: 10.1007/00029395
- Janssen G.J.W., van Norel A., Verkerk-Bakker B., Janssen R., Hoogendoorn J. Introgression of resistance to root-knot nematodes from wild Central American Solanum species into S. tuberosum ssp. tuberosum. Theoretical and Applied Genetics. 1997;95(3):490-496. DOI: 10.1007/s001220050588
- Kasai K., Morikawa Y., Sorri V.A., Valkonen J.P., Gebhardt C., Watanabe K.N. Development of SCAR markers to the PVY resistance gene *Ryadg* based on a common feature of plant disease resistance genes. *Genome*. 2000;43(1):1-8. DOI: 10.1139/g99-092
- Kim H.-J., Lee H.R., Jo K.-R., Mortazavian S.M.M., Huigen D.J., Evenhuis B., Kessel G., Visser R.G.F., Jacobsen E., Vossen J.H.. Broad spectrum late blight resistance in potato differential set plants MaR8 and MaR9 is conferred by multiple stacked R genes. Theoretical and Applied Genetics. 2012;124(5):923-935. DOI: 10.1007/s00122-011-1757-7
- Lamm R. Investigation of some tuber-bearing Solanum hybrids. *Hereditas*. 1953;39(1-2):97-112. DOI: 10.1111/j.1601-5223.1953. tb03404.x

- Mori K., Mukojima N., Nakao T., Tamiya S., Sakamoto Y., Sohbaru N., Hayashi K., Watanuki H., Nara K., Yamazaki K., Ishii T., Hosaka K. Germplasm release: Saikai 35, a male and female fertile breeding line carrying *Solanum phureja*-derived cytoplasm and potato cyst nematode resistance (*H1*) and *Potato Virus Y* resistance (*Ry*_{chc}) genes. *American Journal of Potato Research*. 2012;89(10):63-72. DOI: 10.1007/s12230-011-9221-4
- Murashige T., Skoog F. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*. 1962;15(13):473-479. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x
- Nitsch J.P., Nitsch C. Haploid plants from pollen grains. *Science*. 1969;163(3862):85-87. DOI: 10.1126/science.163.3862.85
- Panahandeh J., Valizadeh M., Khosroshahly M., Yermishin A.P. Khoei F.R., Mahna N. Microsporogenesis and crossing behavior of a tetraploid, interspecific inter-EBN hybrid potato. *Scientia Horticulturae*. 2008;116(4):348-353. DOI: 10.1016/j. scienta.2008.02.006
- Plich J., Przetakiewicz J., Śliwka J., Flis B., Wasilewicz-Flis I., Zimnoch-Guzowska E. Novel gene Sen2 conferring broadspectrum resistance to Synchytrium endobioticum mapped to potato chromosome XI. Theoretical and Applied Genetics. 2018;131(3):2321-2331. DOI: 10.1007/s00122-018-3154-y
- Rietman H., Bijsterbosch G., Cano L.M., Lee H.-R., Vossen J.H., Jacobsen E., Visser R.G.F., Kamoun S., Vleeshouwers V.G.A.A. Qualitative and quantitative late blight resistance in the potato cultivar Sarpo Mira is determined by the perception of five distinct RXLR effectors. *Molecular Plant-Microbe Interactions*. 2012;25(7):910-919. DOI: 10.1094/MPMI-01-12-0010-R
- Shaner G., Finney R.E. The effect of nitrogen fertilization on the expression of slow-mildewing resistance in Knox wheat. *Phytopathology*. 1977;67(8):1051-1056. DOI: 10.1094/Phyto-67-1051
- Song Ye-S., Schwarzfischer A. Development of STS markers for selection of extreme resistance (*Ry*_{sto}) to PVY and maternal pedigree analysis of extremely resistant cultivars. *American Journal of Potato Research*. 2008;85(2):159-170. DOI: 10.1007/s12230-008-9044-0
- Spooner D.M., Rodríguez F., Polgár Z., Ballard H.E. Jr., Jansky S.H. Genomic origins of potato polyploids: GBSSI gene sequencing data. *The Plant Genome [A Supplement to Crop Science]*. 2008;48(1):S-27-S-36. DOI: 10.2135/cropsci 2007.09.0504tpg
- Swaminathan M.S. Notes on induced polyploids in the tuber-bearing Solanum species and their crossability with Solanum tuberosum. American Journal of Potato Research. 1951;28(1):472-489. DOI: 10.1007/BF02854980
- Wang M., Allefs S., van den Berg R.G., Vleeshouwers V.G.A.A., van der Vossen E.A.G., Vosman B. Allele mining in *Solanum*: conserved homologues of *Rpi-blb1* are identified in *Solanum* stoloniferum. Theoretical and Applied Genetics. 2008;116(7):933-943. DOI: 10.1007/s00122-008-0725-3
- Wangenheim K.H. von. Zur Ursache der Kreuzungsschwierigkeiten zwischen Solanum tuberosum L. und S. acaule Bitt. bzw. S. stoloniferum Schlechtd. et Bouche. Zeitschrift für Pflanzenzüchtung. 1954;34:7-48 [in German].
- Watanabe K., Arbizu C., Schmiediche P. Potato germplasm enhancement with disomic tetraploid *Solanum acaule*. I. Efficiency of introgression. *Genome*. 1992;35(1):53-57. DOI: 10.1139/g92-009
- Yermishin A.P. Genetic basis of breeding potato for heterosis (Geneticheskiye osnovy selektsii kartofelya na geterozis). Minsk: Tekhnologiya; 1998. [in Russian] (Ермишин А.П. Генетические основы селекции картофеля на гетерозис. Минск: Технология, 1998).
- Yermishin A.P., Makhan'ko O.V., Voronkova E.V. Production of potato breeding material using somatic hybrids between Solanum tuberosum L. dihaploids and wild diploid species Solanum bulbocastanum Dunal. from Mexico. Russian Journal of Genetics. 2008;44(5):559-566. DOI: 10.1134/ S1022795408050086
- Yermishin A.P., Svitoch O.V., Voronkova E.V., Gukasian O.N., Luksha V.I. Determination of the composition and the allelic state of disease and pest resistance genes in potato parental lines using DNA markers. *Russian Journal of Genetics*. 2016;52(5):498-506. DOI: 10.1134/S1022795416050057
- Yermishin A.P., Levy A.V., Voronkova E.V., Polyukhovich Yu.V.,

Ageeva A.S. Overcoming unilateral incompatibility in crosses with wild allotetraploid potato species *Solanum stoloniferum* Schldtl. & Bouchet. *Euphytica*. 2017;213(11):249. DOI: 10.1007/s10681-017-2041-y

Yermishin A.P., Voronkova E.V., Levy A.V. Involvement of valuable gene pool of wild tetraploid (2 EBN) potato species into breeding (Vovlecheniye v selektsiyu tsennogo genofonda dikikh tetraploidnykh (2 EBN) vidov kartofelya). In: A.P. Yermishin (ed). Interspecific hybridization in potato breeding = Mezhvidovaya gibridizatsiya v selektsii kartofelya). Minsk: Belaruskaya navuka; 2021. p.255-302. [in Russian] (Ермишин А.П., Воронкова Е.В., Левый А.В. Вовлечение

в селекцию ценного генофонда диких тетраплоидных (2 EBN) видов картофеля. В кн.: Межвидовая гибридизация в селекции картофеля / под ред. А.П. Ермишина. Минск: Беларуская навука, 2021. С.255-302).

Yermishin A.P., Levy A.V., Ageeva A.S., Voronkova E.V., Luksha V.I., Gukasian O.N., Zharich V.M. Specifics of transfer of DNA markers of wild allotetraploid potato species *Solanum stoloniferum* to backcross progenies depending on their subgenomic location and used schemes of introgression. *Russian Journal of Genetics*. 2023;59(7):642-653. DOI: 10.1134/S1022795423 0070050

Информация об авторах

Александр Петрович Ермишин, доктор биологических наук, профессор, заведующий, лаборатория генетики картофеля, Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, 220072 Республика Беларусь, Минск, ул. Академическая, 27, ermishin@igc.by, https://orcid.org/0000-0002-3106-4926

Анастасия Сергеевна Агеева, аспирант, Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, 220072 Республика Беларусь, Минск, ул. Академическая, 27, nastya_ageeva95@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-5720-3588

Елена Васильевна Воронкова, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория генетики картофеля, Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, 220072 Республика Беларусь, Минск, ул. Академическая, 27, e.voronkova@igc.by, https://orcid.org/0000-0001-9747-8622

Виктория Ивановна Лукша, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория генетики картофеля, Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, 220072 Республика Беларусь, Минск, ул. Академическая, 27, saphyjana2@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-7139-4876

Ольга Николаевна Гукасян, научный сотрудник, лаборатория генетики картофеля, Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, 220072 Республика Беларусь, Минск, ул. Академическая, 27, gukasyan.olya@bk.ru, https://orcid.org/0009-0006-9795-8363 Виктор Михайлович Жарич, научный сотрудник, лаборатория генетики картофеля, Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, 220072 Республика Беларусь, Минск, ул. Академическая, 27, Trubo dur@tut.by, https://orcid.org/0009-0003-6114-9204

Information about the authors

Alexander P. Yermishin, Dr. Sci. (Biology), Professor, Head, Laboratory of Potato Genetics, Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus, 27, Akademicheskaia Street, Minsk, 220072 Belarus, ermishin@igc.by, https://orcid.org/0000-0002-3106-4926

Anastasiya S. Ageeva, postgraduate student, Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus, 27, Akademicheskaia Street, Minsk, 220072 Belarus, nastya ageeva95@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-5720-3588

Elena V. Voronkova, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Laboratory of Potato Genetics, Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus, 27, Akademicheskaia Street, Minsk, 220072 Belarus, e.voronkova@ige.by, https://orcid.org/0000-0001-9747-8622 Victoriya I. Luksha, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Laboratory of Potato Genetics, Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus, 27, Akademicheskaia Street, Minsk, 220072 Belarus, saphyjana2@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-7139-4876

Olga N. Gukasian, Researcher, Laboratory of Potato Genetics, Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus, 27, Akademicheskaia Street, Minsk, 220072 Belarus, gukasyan.olya@bk.ru, https://orcid.org/0009-0006-9795-8363

Victor M. Zharich, Researcher, Laboratory of Potato Genetics, Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus, 27, Akademicheskaia Street, Minsk, 220072 Belarus, Trubo_dur@tut.by, https://orcid.org/0009-0003-6114-9204

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 25.10.2023; одобрена после рецензирования 26.01.2024; принята к публикации 28.02.2024.

The article was submitted on 25.10.2023; approved after reviewing on 26.01.2024; accepted for publication on 28.02.2024.

СОХРАНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ

Обзорная статья УДК 581.143.60

DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1-03



Эндемик Алтая Sibiraea altaiensis (Laxm.) Schneid.: возможное использование и способы сохранения

М. В. Серафимович, М. В. Ефимова

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Марина Васильевна Ефимова, stevmv555@gmail.com

В статье представлен обзор данных об эндемике Алтая, одном из архаичных видов рода Sibiraea Maxim – S. altaiensis (Laxm.) Schneid. Вид включен в Красные книги Республики Алтай, Алтайского края и Казахстана как редкий, численность которого сокращается, в большей степени, вследствие воздействия антропогенных факторов в местах его обитания. В то же время сибирка алтайская относится к хозяйственно-ценным растениям и ценится за свои декоративные, лечебные и другие полезные свойства. Размножение вида осуществляется семенами, отводками, корневыми и летними черенками, однако данные способы не всегда дают хорошие результаты, а также требуют больших площадей для выращивания растений и приурочены к определенному сезону года.

Перспективным методом размножения и сохранения *S. altaiensis* может стать микроклональное размножение растений, которое заключается в использовании техники *in vitro* для быстрого получения неполовым путем растений, генетически идентичных исходному экземпляру, при заметной экономии времени и пространства, необходимых для выращивания посадочного материала. Применение микроклонирования для сохранения и размножения редких и исчезающих видов весьма оправдано, поскольку оно позволяет значительно увеличить коэффициент размножения видов растений, которые трудно или совсем не размножаются вегетативно, или имеют низкую жизнеспособность, или семенную продуктивность.

Используя протоколы *in vitro* размножения сибирки алтайской, из одной боковой почки, которую использовали в качестве экспланта, было получено 10-28 микропобегов при культивировании на модифицированной и классической по составу питательной среде Мурасиге и Скуга (МС), которые были дополнены 1,0 мг/л 6-бензиламинопурина (6-БАП). Данные работы являются подтверждением того, что клонирование *in vitro* обеспечивает высокий коэффициент размножения *S. altaiensis* и, тем самым, позволяет сохранить генофонд вида и получить посадочный материал в коммерческих масштабах без нанесения ущерба естественным популяциям.

Ключевые слова: сибирка алтайская, редкий вид, микроклональное размножение, культура *in vitro*, семенное и вегетативное размножение, интродукция, ресурсные растения

Благодарности: Статья подготовлена при поддержке проекта РНФ (№ проекта 23-44-10019).

Для цитирования: Серафимович М.В., Ефимова М.В. Эндемик Алтая *Sibiraea altaiensis* (Laxm.) Schneid.: возможное использование и способы сохранения. *Биотехнология и селекция растений*. 2024;7(1):35-42. DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1-03

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.

© Серафимович М.В., Ефимова М.В., 2024

CONSERVATION OF PLANT GENETIC RESOURCES USING BIOTECHNOLOGICAL APPROACHES

Review article

DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1-03

The Altai endemic Sibiraea altaiensis (Laxm.) Schneid.: possible use and methods of conservation

Maria V. Serafimovich, Marina V. Efimova

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

Corresponding author: Marina V. Efimova, stevmv555@gmail.com

The article provides a review of data on the Altai endemic Sibiraea altaiensis (Laxm.) Schneid., one of the archaic species of the genus Sibiraea Maxim. The species is included in the Red Books of the Altai Republic, the Altai Territory, and of Kazakhstan as a rare species, whose numbers are decreasing, mostly due to the influence of anthropogenic factors in its habitats. At the same time, S. altaiensis belongs to agriculturally important species, which is valued for its decorative, medicinal and other useful properties. The species is reproduced by seed, layering shoots, root and summer stem cuttings; however, these methods do not always give good results, and also require large areas for growing plants and are confined to a certain season of the year. Microclonal propagation of plants can become a promising method for the propagation and conservation of S. altaiensis. It consists in the use of in vitro techniques of rapid asexual production of plants that are genetically identical to the original specimen, with a significant saving of time and space required for growing planting material. The use of microcloning for the conservation and reproduction of rare and endangered species is highly justified, since it allows a significant increase in the reproduction rate of plant species, which are difficult or impossible to reproduce vegetatively, or those with low viability or seed productivity.

Using *in vitro* protocols for the propagation of *S. altaiensis*, 10-28 microshoots were obtained from one lateral bud, which was used as an explant, when cultivated on a modified and a classic Murashige and Skoog (MS) nutrient media supplemented with 1.0 mgL⁻¹ 6-benzylaminopurine (6-BAP). These works confirm that *in vitro* cloning ensures a high reproduction rate of *S. altaiensis* and, thus, makes it possible to preserve the gene pool of the species and obtain planting material on a commercial scale without causing damage to natural populations.

Keywords: Altai sibirea, rare species, microclonal propagation, in vitro culture, seed and vegetative propagation, introduction, resource plants

Acknowledgments: The article was prepared with the support of the RNF Project No. 23-44-10019.

For citation: Serafimovich M.V., Efimova M.V. The Altai endemic Sibiraea altaiensis (Laxm.) Schneid.: possible use and methods of conservation. Plant biotechnology and breeding. 2024;7(1):35-42. (In Russ.). DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1-o3

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

© Serafimovich M.V., Efimova M.V., 2024

Введение

В настоящее время среди основных экологических проблем особое место занимает сокращение биологического разнообразия, которое в большей степени происходит под воздействием антропогенных факторов. К сокращающимся по численности видам относятся многие дикорастущие хозяйственно-ценные растения, нерациональное использование которых может привести к истощению их естественных популяций и угрозе исчезновения. Одним из таких видов является Sibiraea altaiensis (Laxm.) Schneid., ценность которого обуславливается декоративными, лечебными и другими полезными свойствами.

Sibiraea (сибирка altaiensis алтайская) относится к роду Sibiraea Maxim. (Сибирка) подсемейства Spiraeoideae Agardh. (Спирейные) семейства Rosaceae Juss. (Розоцветные). Представляет собой листопадный двудомный энтомофильный кустарник до 1,5 м высотой (рис.), который характеризуется средней скоростью роста, цветет с мая по июль, плодоносит в период с конца июля по первую половину августа (Polozhij, Malyshev, 1988; Krasnoborov, Artemov, 2012; Koropachinskij, Vstovskaya, 2012).

Вид имеет разорванный ареал. В России в естественных условиях произрастает в западной части Русского Алтая, занимая территорию около 74 тыс. км². В Республике Алтай встречается в Усть-Канском, Усть-Коксинском и Шебалинском районах: на хребтах Теректинском, Катунском, Холзун, Семинском, Иолго. В Алтайском крае распространена в Змеиногорском, Краснощёковском

и Чарышском районах. За пределами России встречается в Казахстанском Алтае (хребты Ивановский, Убинский, Нарымский, Южный Алтай), в нескольких точках Юго-Восточной Европы (Босния, Хорватия), а также в Западном и Центральном Китае. S. altaiensis произрастает в лесостепном и лесном поясах, заходит в субальпийский пояс, от 900 до 2100 м над уровнем моря. Растет на лугах, открытых склонах или под пологом лиственничных и лиственнично-березовых лесов в средней и верхней части горно-лесного пояса. Произрастает небольшими группами, образуя заросли, и единичными экземплярами. Предпочитает почвы с умеренным содержанием элементов минерального питания и может расти в условиях с временно недостаточным увлажнением. Отличается низкой устойчивостью к засолению почв и загазованности воздуха, среднеустойчива к затенению, относиться к морозостойким растениям (Polozhij, Malyshev, 1988; Kamelin, Shmakov, 2006; Koropachinskij, Vstovskaya, 2012; Red Data..., 2014; Maneev et al., 2017).

S. altaiensis — редкий вид, включенный в Красные книги Республики Алтай, Алтайского края и Казахстана как реликт Алтайско-Саянской ботанико-географической провинции. Лимитирующими факторами являются пространственная изоляция популяций по всему ареалу, низкая семенная продуктивность и возобновляемость популяций, ослабленный природный генофонд. Численность вида также уменьшается под влиянием хозяйственной деятельности в местах обитания растения. Рубки лиственничников с подлеском из сибирки и выпас скота, который приводит к гибели всходов, негативно влияют на состояние сообществ и ведут к вытеснению и заме-



Puc. Sibiraea altaiensis. Казахстан, Акмолинская область, Щучинск, дендрарий TOO «КазНИИЛХА им. А.Н. Букейхана» (по Kirillov et al., 2019).

Fig. Sibiraea altaiensis. Kazakhstan, Akmola Region, Shchuchinsk, arboretum of the A.N. Bukeikhan KazRIFA LLP (after Kirillov et al., 2019).

не сибирки более устойчивым видом – курильским чаем. В качестве охранных мер вид включен в состав сообществ, занесенных в Зеленую книгу Сибири – сообщество сибирки алтайской и лиственничный лес с подлеском из сибирки. В Республике Алтай *S. altaiensis* произрастает в Катунском заповеднике, в Казахстане – в Западно-Алтайском государственном природном заповеднике и Катон-Карагайском государственном национальном природном парке (Kamelin, Shmakov, 2006; Red Data..., 2014; Maneev et al., 2017; Kotuxov et al., 2017).

Практическое применение сибирки алтайской

S. altaiensis представляет интерес как декоративное растение с красивым габитусом, орнаментальной листвой, окрашивающейся осенью в яркие багряные цвета и долго не опадающей, а также декоративными, многочисленными, крупными метельчатыми соцветиями. Рекомендуется в качестве кустарника для одиночной, групповой и бордюрной посадки, для внутриквартального озеленения крупных парков, где сибирка образует красивые группы с лиственницами. Хорошо переносит стрижку и может быть использована для создания живых изгородей (Коtuxov et al., 2017; Myrzagalieva, 2020).

Вид применяется как лекарственное растение при желтухе – вирусной болезни человека и животных. Отвар, приготовленный на основе ветвей *S. altaiensis*, получивший довольно широкое распространение на Алтае, показан к применению при гепатите, лихорадке и инсульте. Листья этого растения применяют в качестве суррогата чая. Жители Тибета употребляют молодые листья и побеги растений рода *Sibiraea* для улучшения пищеварения в виде чая, под называнием «Liucha», долгосрочное употребление которого приводит к снижению веса. Надземная часть сибирки применяется для лечения гипопепсии, гиперлипидемии и расстройств желудка (Ророу, 2008; Ailchieva, Syeva, 2015; Kostikova et al., 2019a;b).

Химический состав вегетативных органов растений S. altaiensis

Лечебные свойства *S. altaiensis* обусловлены ее богатым химическим составом. Имеются данные о наличии алкалоидов, дубильных веществ, флавоноидов и хинонов в надземной части данного вида, в листьях — урсоловой кислоты, в корнях, ветвях и плодах — синильной кислоты (Sokolov, 1987). Из надземных частей (листья, стебли, соплодия) растений были выделены монотерпены, монотерпеновые гликозиды, протокатеховая, 4-гидроксимасляная, феруловая и кофейная кислоты, гидроксикумарин, эфир фталевой кислоты, лигнаны, стерины, обладающие выраженной гиполипидемической, противоопухолевой и антиоксидантной активностью (Zhao et al., 2016; 2017; Deng et al., 2017; Kostikova et al., 2018a;b;d). Исследования состава фенольных соединений в листьях *S. altaiensis* позволили идентифицировать шесть флавоноидов — квер-

цетин и его гликозиды (гиперозид, изокверцитрин, рутин, авикулярин), гликозид кемпферола – астрагалин и пять кислот - хлорогеновую, кофейную, п-кумаровую, эллаговую и коричную. Значительных различий в составе фенольных соединений между мужскими и женскими растениями, а также дикорастущими и интродуцированными экземплярами, обнаружено не было. Преобладающими веществами в экстрактах из листьев S. altaiensis, произрастающей в природных популяциях, являлись гиперозид, эллаговая кислота, флавонол и фенолокислоты, в условиях интродукции дополнительно к вышеперечисленным соединениям – астрагалин и флавон (Kostikova et al., 2018a;b;d). Однако в листьях интродуцированных растений не были обнаружены кемпферол, феруловая и протокатеховая кислоты, идентифицированные другими авторами (Deng et al., 2017; Zhao et al., 2017). Изучены содержание биологически активных веществ и уровень антиоксидантной активности в надземных органах S. altaiensis разных половых форм в течение вегетационного сезона. Установлено, что максимальное содержание биологически активных соединений варьировало в зависимости от стадии развития и органа растения, а также половой принадлежности. В листьях мужских растений в фазу бутонизации содержалось наиболее высокое количество флавоноидов и дубильных веществ, в соцветиях женских растений - катехинов, в бутонах мужских растений - пектинов, в листьях мужских растений в фазу бутонизации и в листьях женских растений в фазу плодоношения - протопектинов, в листьях мужских и женских растений в фазу плодоношения каротиноидов. В стеблях было обнаружено достаточно высокое содержание дубильных веществ, пектинов, протопектинов и каротиноидов. Самая высокая антиоксидантная активность выявлена в водных и водно-этанольных экстрактах из листьев мужских растений S. altaiensis (Kostikova, 2019a;b).

Имеются сведения, что в листьях *S. altaiensis* содержатся эфирные масла, основной состав которых – тритерпеновые кислоты, в частности урсоловая кислота (Kirillov et al., 2014). Исследование компонентного состава эфирного масла из листьев, собранных в Алтайском ботаническом саду (Восточно-Казахстанская область), показало, что основными его компонентами являлись метилкетон – 2-пентадеканон, насыщенный предельный углеводород – тетрадекан и ненасыщенный кетон – *транс*-β-ионон (Kirillov et al., 2016). Были изучены состав и антиоксидантная активность эфирного масла надземной части растений (Lai et al., 2016).

Размножение интродуцируемых растений сибирки алтайской

Размножается *S. altaiensis* семенами, не требующими предварительной обработки, отводками, корневыми и летними черенками. Данные методы часто применяются в ботанических садах и дендрариях при интродук-

ции и для размножения редких видов растений с целью сохранения их генофонда. Был проведен эксперимент с проращиванием семян S. altaiensis, собранных в двух местонахождениях: первое - в 1,5 км южнее города Риддер в Восточно-Казахстанской области, второе - «Западно-Алтайский государственный природный заповедник» Республики Казахстан. Всхожесть семян была достаточно высокой (66% и 82%, соответственно), при этом всходы не подвергались болезням и имели умеренную морозоустойчивость (Orazaeva, 2018). Рост и развитие интродуцированных в условиях Горно-Алтайского ботанического сада растений S. altaiensis, выращенных из семян, в первые годы проходили быстрыми темпами; за вегетационный год высота растений в среднем прибавлялась на 9-26 см. На третий год выращивания растения S. altaiensis еще не достигли генеративного состояния, но имели декоративные свойства. На четвертый год отдельные растения достигли 35 см в высоту. Растения не подвергались болезням, были теневыносливы, нетребовательны к почве, морозоустойчивы (Syeva, Ailchieva, 2014; Ailchieva, 2016).

Было изучено применение ростовой пудры (100 г талька на 100 мг гетероауксина) и пчелиного меда в качестве стимуляторов корнеобразования зеленых черенков *S. altaiensis*. Результаты показали, что при использовании ростовой пудры процент укореняемости черенков составил 64%, при использовании пчелиного меда — 78% по сравнению с необработанными черенками (52%). Оптимальным сроком черенкования был июнь (Balabushka, 1985). Однако традиционные методы размножения *S. altaiensis* не всегда дают хорошие результаты, а также требуют больших площадей для выращивания растений и приурочены к определенному сезону года (Khlebova et al., 2020).

Микроклональное размножение S. altaiensis

Перспективным методом размножения и сохранения данного редкого хозяйственно-ценного вида может стать микроклональное размножение растений. Этот метод считается наиболее надежным с точки зрения генетической стабильности размножаемых форм, и за достаточно короткий срок позволяет получить высокий коэффициент размножения даже таких видов, которые трудно размножаются вегетативно или имеют низкую семенную продуктивность. К преимуществам микроразмножения растений также относятся способность размножать растительный материал в любое время года и планировать выпуск растений к определенному сроку; миниатюризация процесса, приводящая к экономии площадей, занятых маточными и размножаемыми растениями; возможность хранения экземпляров в условиях минимального роста, позволяющая избежать затрат на ежегодное оздоровление растений, и обменивать его в международном масштабе без риска заражения карантинными вредителями и болезнями (Bonga, Durzan, 1987).

Первые работы по микроклональному размноже-

нию S. altaiensis были проведены в 2016 году. На начальном этапе были подобраны тип экспланта и режим стерилизации для введения сибирки алтайской в культуру in vitro (Serafimovich et al., 2016; 2017). Далее коллективом авторов (Kirillov et al., 2019) были проведены экспериментальные исследования, на основании которых были определены состав питательной среды, тип и концентрация биологически активных веществ и режим культивирования для эффективного микроразмножения и укоренения в культуре in vitro эксплантов S. altaiensis. Также были рекомендованы условия для улучшения приживаемости растений-регенерантов в условиях ex vitro. Согласно полученным данным (Kirillov et al., 2019), в качестве первоначальных эксплантов использовали боковые почки растений S. altaiensis, интродуцированных в дендрарии Казахского научно-исследовательского института лесного хозяйства и агролесомелиорации им. А.Н. Букейхана (Щучинск, Казахстан). Для освобождения эксплантов от контаминации применяли ступенчатую стерилизацию, где основными стерилизующими агентами являлись 0,025% тимерозал (мертиолят) в сочетании с 7% водным раствором коммерческого отбеливателя гипохлорита натрия (Белизна). На всех этапах микроклонального размножения экспланты культивировали на агаризованной (0,35%) модифицированной питательной среде МС. Высокий коэффициент размножения S. altaiensis, который составил 28 побегов на эксплант, был достигнут на 10-ом пассаже при чередовании циклов культивирования на безгормональной модифицированной питательной среде МС в течение 3 недель и модифицированной питательной среде МС, дополненной 1,0 мг/л 6-БАП, в течение трёх недель. Лучше всего побеги укоренялись в условиях in vitro на модифицированной питательной среде МС без регуляторов роста растений в течение четырёх недель. Для адаптации к нестерильным условиям среды укорененных in vitro растений эффективным был субстрат из торфа, песка и вермикулита в соотношении 1:1:1. Приживаемость ex vitro растений в культуральной камере по истечении двух месяцев составляла 83%, а при переносе в открытый грунт через два месяца снижалась до 50%. Согласно полученным данным (Serafimovich et al., 2019), в открытом грунте на второй год был отмечен интенсивный рост в высоту и ветвление растений-регенерантов, на третий год наблюдалось их цветение.

При введении в культуру *in vitro* растений *S. altaiensis* из природных популяций Онгудайского района Республики Алтай также были использованы пазушные почки (Khlebova et al., 2020). Однако протокол микроклонального размножения был несколько модифицирован по сравнению с опубликованным ранее (Kirillov et al., 2019). В работе (Khlebova et al., 2020) наиболее эффективным стерилизующим агентом для получения асептической культуры являлся 30% пероксид водорода при обработке в течение 25 мин. Экспланты культивировали на агаризованной (0,5%) питательной среде МС, дополненной 30 г/л сахарозы и различными концентрациями цитокининов —

6-БАП, кинетина и тидиазурона. Высокий коэффициент размножения (10-12 побегов на эксплант) был достигнут чередованием циклов культивирования микропобегов на безгормональной питательной среде МС и питательной среде МС, содержащей 1,0 мг/л 6-БАП.

Заключение

Таким образом, редкий эндемичный вид S. altaiensis является перспективным растением для практического использования благодаря декоративным и лечебным свойствам. Получение посадочного материала растений S. altaiensis возможно традиционными способами, преимущественно семенами и летним черенкованием. Перспективным методом размножения и сохранения данного вида является микроклональное размножение, эффективность которого обуславливается возможностью получения оздоровленного, генетически однородного посадочного материала. Использование разработанных протоколов (Kirillov et al., 2019; Khlebova et al., 2020), позволяющих получать высокий коэффициент микроклонального размножения S. altaiensis, предоставляет возможность размножения данного вида в коммерческих масштабах и сохранения его генофонда без нанесения ущерба его естественным популяциям.

References/Литература

- Ailchieva A.O., Syeva S.Ya. A study of the endemic Altai sibirea in culture (Izuchenie endemika sibirki altaiskoy v kulture). Eurasian Union of Scientists. 2015;9(18):5-8. [in Russian] (Аильчиева А.О., Сыева С.Я. Изучение эндемика сибирки алтайской в культуре. Евразийский Союз Ученых. 2015;9(18):5-8).
- Ailchieva A.O. Some indicators of rare and endangered species in culture (Nekotorye pokazateli redkikh i ischezayushchikh vidov v kulture). Novaya nauka: strategii i vektory razvitiya = New Science: Strategies and Vectors of Development. 2016;2-2(64):3-8. [in Russian] (Аильчиева А.О. Некоторые показатели редких и исчезающих видов в культуре. Новая наука: стратегии и векторы развития. 2016;2-2(64):3-8).

 Balabushka V.K. Stimulation of vegetative propagation of woody
- Balabushka V.K. Stimulation of vegetative propagation of woody introduced species using growth powder and bee honey (Stimulyatsiya vegetativnogo razmnozheniya drevesnykh introdutsentov s pomoshchyu rostovoy pudry i pchelinogo myoda). Bulletin of Higher Educational Institutions. Lesnoj zhurnal (Russian Forestry Journal). 1985;(6):118-119. [in Russian] (Балабушка В.К. Стимуляция вегетативного размножения древесных интродуцентов с помощью ростовой пудры и пчелиного меда. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 1985;(6):118-119).
- Bonga J.M., Durzan D.J. (eds.) Cell and tissue culture in forestry. General principles and biotechnology. Dordrecht: Springer; 1987. DOI: 10.1007/978-94-017-0994-1
- Deng Y., Zhao J.-Q., Mei L.-J, Tao Y.-D. Two new monoterpenes from Sibiraea laevigata. Journal of Asian Natural Products Research. 2017;19(9):877-883. DOI: 10.1080/10286020.2016.1258064
- Kamelin R.V., Shmakov A.I. (eds). Red Book of the Altai Territory. Rare and endangered plant species (Krasnaya kniga Altaiskogo Kraya. Redkie i nakhodyashchiesya pod ugrozoy ischeznoveniya vidy rastenii). Barnaul: Publishing and Printing Enterprise Altai; 2006. [in Russian] (Красная книга Алтайского края. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений / под ред. Р.В. Камелина, А.И. Шмакова. Барнаул: ИПП Алтай; 2006).

- Kirillov V.Yu., Stikhareva T.N., Serafimovich M.V., Terekhova S.V. Sibiraea altaiensis is a promising object for forest biotechnology and phytochemistry in Kazakhstan (Sibiraea altaiensis perspektivnyj ob'ekt dlya lesnoj biotekhnologii i fitohimii v Kazahstane). In: Biotechnological methods in conservation of biodiversity and plant breeding: Proceeding of the International Scientific Conference; 2014 August 18-20; Minsk, Republic of Belarus. Minsk; 2014. p.105-107. [in Russian] (Кириллов В.Ю., Стихарева Т.Н., Серафимович М.В., Терехова С.В. Sibiraea altaiensis – перспективный объект для лесной биотехнологии и фитохимии в Казахстане. В кн.: Биотехнологические приемы в сохранении биоразнообразия и селекции растений: сборник статей Международной научной конференции; 18-20 августа 2014 г.; Минск, Республика Беларусь. Mинск; 2014. С.105-107). URL: https://microklon.ru/uploads/_ радеs/441/proceedings-cbg.biotech-2014_.pdf [дата обращения: 05.09.2023].
- Kirillov V.Yu., Stikhareva T.N., Mukanov B.M., Serafimovich M.V., Mukasheva F.T., Gering A.V., Sarsenbaeva L.A., Atazhanova G.A., Adekenov S.M. Chemical composition of essential oil from Sibiraea altaiensis. Chemistry of Natural Compounds. 2016;52(5):941-942. DOI: 10.1007/s10600-016-1826 x
- Kirillov V., Serafimovich M., Stikhareva T., Mukanov B. In vitro micropropagation of ornamental rare species Sibiraea altaiensis: An endemic of Altai. International Journal of Agriculture and Biology. 2019;21(5):997-1003. DOI: 10.17957/IJAB/15.0985
- Khlebova L.P., Mironenko O.N., Brovko E.S. Features of introduction into *in vitro* culture of *Sibiraea altaiensis* (Laxm.) Schneid (Osobennosti vvedeniya v kul'turu in vitro Sibiraea altaiensis (Laxm.) Schneid.). In: A.Yu. Prosekov (ed.). Modern biotechnology: topical issues, innovations and achievements: Collection of abstracts of the All-Russian online conference with international participation; 2020 October 21; Kemerovo, Russia (Sovremennaya biotekhnologiya: aktual'nye voprosy, innovacii i dostizheniya: sbornik tezisov Vserossijskoj s mezhdunarodnym uchastiem onlajn-konferencii; 21 oktyabrya 2020; Kemerovo, Rossiya). Kemerovo: Kemerovo State University; 2020. p.262-264. [in Russian] (Хлебова Л.П., Мироненко О.Н., Бровко Е.С. Особенности введения в культуру in vitro Sibiraea altaiensis (Laxm.) Schneid. В кн.: Современная биотехнология: актуальные вопросы, инновации и достижения: сборник тезисов Всероссийской с международным участием онлайнконференции; 21 октября 2020 г.; Кемерово, Россия / под общ. ред. А.Ю. Просекова. Кемерово; 2020. С.262-264). URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_44300378_49409005.pdf [дата обращения: 05.09.2023].
- Koropachinskij I.Yu., Vstovskaya T.N. Woody plants of the Asian part of Russia (Drevesnye rasteniya Aziatskoy Rossii). Novosibirsk: «Geo» Academic Publishers; 2012. [in Russian] (Коропачинский И.Ю., Встовская Т.Н. Древесные растения Азиатской России. Новосибирск: Академическое издательство «Гео»; 2012).
- Kostikova V.A., Xramova E.P., Syeva S.Ya. The content of phenolic compounds in the leaves of Sibiraea altaiensis (Rosaceae) during introduction and in nature (Soderzhanie fenolnykh soedinenii v listyakh Sibiraea altaiensis (Rosaceae) pri introduktsii i v prirode). Rastitelnye resursy. 2018a;54(3):409-419. [in Russian] (Костикова В.А., Храмова Е.П., Сыева С.Я. Содержание фенольных соединений в листьях Sibiraea altaiensis (Rosaceae) при интродукции и в природе. Растительные ресурсы. 2018a;54(3): 409-419).
- Kostikova V.A., Khramova E.P., Syeva S.Ya. The composition of phenolic compounds of Sibiraea altaiensis (Rosaceae). In: N.V. Zagoskin (ed.). Phenolic compounds: properties, activity, innovations: a collection of scientific articles based on the materials of the X International Symposium «Phenolic compounds: fundamental and applied aspects»; 2018 May 14-19; Moscow, Russia. Moscow: Institute of Plant Physiology of the Russian Academy of Sciences; 2018b. p.306-310. [in Russian] (Костикова В.А., Храмова Е.П., Сыева С.Я. Состав фенольных соединений Sibiraea altaiensis (Rosaceae). В кн.: Фенольные соединения: свойства, активность, инноващии: сборник научных статей по материалам X Международного

симпозиума; 14-19 мая 2018 г.; Москва, Россия / отв. ред. H.B. Загоскина. 2018b. C.306-310). URL: http://biophenols. ru/2018/FenSympMoscow2018-Sbornik-tom1.pdf [дата обращения:

Kostikova V.A., Vysochina G.I., Khramova E.P., Syeva S.Ya. The specificity of the composition of phenolic compounds in the leaves Sibiraea altaiensis (Laxm.) Schneid. In: A.P. Belanova (ed.). Prospects for the development and problems of modern botany: Materials of the IV (VI) All-Russian Youth Conference with the participation of foreign scientists; 2018 October 08-12; Novosibirsk, Russia. Novosibirsk: Academizd; 2018d. р.120-122. [in Russian] (Костикова В.А., Высочина Г.И., Храмова Е.П., Сыева С.Я. О специфичности состава фенольных соединений в листьях Sibiraea altaiensis (Laxm.) Schneid. В кн.: Перспективы развития и проблемы современной ботаники: материалы IV (VI) Всероссийской молодежной конференции с участием иностранных ученых; Новосибирск, 08-12 октября 2018 г.; Новосибирск, Россия / отв. ред. А.П. Беланова. Новосибирск: Академиздат; 2018d. C.120-122). URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_36863887_58920419.pdf [дата обращения: 05.09.2023].

Kostikova V.A., Kukushkina T.A., Shaldaeva T.M., Khramova E.P., Syeva S.Y. Biological active substances and antioxidant activity of Sibiraea altaiensis (Laxm.) Schneid. (Rosaceae). Khimija Rastitel'nogo Syr'ja = Chemistry of plant raw material. 2019a;4:181-190. [in Russian] (Костикова В.А., Кукушкина Т.А., Шалдаева Т.М., Храмова Е.П., Сыева С.Я. Биологически активные вещества и антиоксидантная активность Sibiraea altaiensis (Laxm.) Schneid. (Rosaceae). Химия растительного

сырья. 2019а;4:181-190). DOI: 10.14258/jcprm.2019045376 Kostikova V.A., Kukushkina T.A. Shaldaeva T.M. Khramova E.P. Syeva S.Ya. Biologically active substances and antioxidant activity of Sibiraea altaiensis (Laxm.) Schneid. (Rosaceae). In: Forest resources protection and rational use: Materials of the X International Forum; 2019 June 5-6; Blagoveshchensk, Russia. Blagoveshchensk: Publishing House of Far Eastern State Agrarian University; 2019b. Pt 2. р.259-261. [in Russian] (Костикова В.А., Кукушкина Т.А., Шалдаева Т.М., Храмова Е.П., Сыева С.Я. Биологически вещества и антиоксидантная активные активность Sibiraea altaiensis (Laxm.) Schneid. (Rosaceae). В кн.: Охрана и рациональное использование лесных ресурсов: материалы X международного форума; 05-06 июня 2019 г.; Благовещенск, Россия. Благовещенск: Изд-во Дальневосточного государственного аграрного университета; 2019b. Ч. 2. C.259-261). URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_38429053_95445840.pdf [дата обращения: 05.09.2023].

Kotukhov Yu.A., Danilova A.N., Anufrieva O.A. Altai sibirea (Sibiraea altaiensis (Laxm.) Schneid.) as a rare species in the flora of Kazakhstan (Sibirka altaiskaya (Sibiraea altaiensis (Laxm.) Schneid.) – redkii vid flory Kazakhstana). Botanical research of Siberia and Kazakhstan. 2017;23:50-74. [in Russian] (Котухов Ю.А., Данилова А.Н., Ануфриева О.А. Сибирка алтайская (Sibiraea altaiensis (Laxm.) Schneid.) – редкий вид флоры Казахстана. Ботанические исследования Сибири и Казахстана. 2017;23:50-74).

Krasnoborov I.M., Artemov I.A. (eds.). Key to plants of the Republic of Altai (Opredelitel rasteniy Respubliki Altay). Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2012. [in Russian] (Определитель растений Республики Алтай / под ред. И.М. Красноборова,

И.А. Артемова. Новосибирск: Издательство СО РАН; 2012). Lai P.-X., Zhang X.-M., Tian Z.-H., Liu X. Composition and antioxidant activity of the essential oil from aerial parts of Sibiraea laevigata. Chemistry of Natural Compounds. 2016;52(3):525-526. DOI: 10.1007/s10600-016-1698-0

Maneev A.G., Achimova A.A., Sedelnikova N.V., Gorbunova I.A. (eds). Red Book of the Republic of Altai (plants) (Krasnaya kniga Respubliki Altay (rasteniya)). Gorno-Altaisk; 2017. [in Russian] (Красная книга Республики Алтай (растения) / поред. А.Г. Манеева, А.А. Ачимовой, Н.В. Седельниковой, И.А. Горбуновой. Горно-Алтайск; 2017).

Myrzagalieva A.B. Endemic rare and endangered useful plants of

East Kazakhstan. In: V.A. Agafonov (ed.). Problems of botany: history and modernity: Proceedings of the International scientific conference dedicated to the 130th anniversary of the birth of prof. B.M. Kozo-Polyansky, the 80th anniversary of the birth of prof. K.F. Khmelev, IX scientific meeting «Flora of Central Russia»; 2020 February 03-07; Voronezh, Russia (Problemy botaniki: istoriya i sovremennost': materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, posvyashchennoj 130-letiyu so dnya rozhdeniya prof. B.M. Kozo-Polyanskogo, 80-letiyu so dnya rozhdeniya prof. K.F. Hmelyova, IX nauchnogo soveshchaniya «Flora Srednej Rossii»; 3-7 fevralya 2020; Voronezh, Rossiya). Voronezh: Digital typography; 2020. p.268-273. [in Russian] (Мырзагалиева А.Б. Эндемичные редкие и исчезающие полезные растения Восточного Казахстана. В кн.: Проблемы ботаники: история и современность: материалы Международной научной конференции, посвященной 130-летию со дня рождения проф. Б.М. Козо-Полянского, 80-летию со дня рождения проф. К.Ф. Хмелёва, ІХ научного совещания «Флора Средней России»; 3-7 февраля 2020 г.; Воронеж, Россия / под ред. В.А. Агафонова. Воронеж: Цифровая полиграфия; 2020. С.268-273). URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_42369589_92945077.pdf [дата обращения:

Orazaeva M.K. Experimental study of the germination of planted seeds and cuttings of the endemic of the West Altai State Nature Reserve Sibiraea altaiensis (Eksperimentalnoe izuchenie vshkozhesti posazhennykh semyan i cherenkov endemika Zapadno-Altaiskogo gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika Sibiraea altaiensis). Biosfernoe khozyaistvo: teoriya i praktika = Biosphere economy: theory and practice. 2018;1(4):43-46. [in Russian] (Оразаева М.К. Экспериментальное изучение всхожести посаженных семян и черенков эндемика Западно-Алтайского государственного природного заповедника Sibiraea altaiensis. хозяйство: Биосферное теопия и практика. 2018;1(4):43-46).

Polozhij A.V., Malyshev L.I. (eds.). Flora Sibiriae: Rosaceae. Novosibirsk: Science, Siberian branch; 1988. [in Russian] (Флора Сибири: Rosaceae / под ред. А.В. Положий, Л.И. Малышева. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение; 1988).

Popov P.L. Plant species, using against virous infections of man and animals: regularities of the distribution in the phylogenetic classification system. *Journal of Stress Physiology and Biochemistry*. 2008;4(3):17-64. [in Russian] (Попов П.Л. Виды растений, применявшиеся при вирусных болезнях человека и животных: закономерности распределения в филогенетической классификационной системе. Журнал физиологии стресса и биохимии. 2008;4(3):17-64).

Red Data Book of Kazakhstan. 2nd edition revised and enlarged.
Vol. 2. Plants (Krasnaya kniga Kazakhstana. Izdanie 2-e, pererabotannoe i dopolnennoe. T. 2. Rasteniya). Astana: ArtPrint XXI; 2014. [in Russian] (Красная книга Казахстана. Издание 2-е, переработанное и дополненное. Т. 2. Растения. Астана: AptPrint XXI: 2014).

Serafimovich M.V., Kirillov V.Yu., Stikhareva T.N., Manabaeva A.U. The selection of sterilization mode and type of explant for propagation in in vitro culture of Sibiraea altaiensis (Laxm.) C.K. Schneid (Podbor rezhima sterilizatsii i tipa eksplanta dlya vvedeniya v kul'turu in vitro sibirki altaiskoy (Sibiraea altaiensis (Laxm.) C.K. Schneid)). Bulletin of the Shakarim State University of Semey = Vestnik gosudarstvennogo universiteta imeni Shakarima goroda Semej. 2016;1(73):111-114. [in Russian] (Серафимович М.В., Кириллов В.Ю., Стихарева Т.Н., Манабаева А.У. Подбор режима стерилизации и типа экспланта для введения в культуру in vitro сибирки алтайской (Sibiraea altaiensis (Laxm.) С.К. Schneid). Вестник государственного университета имени Шакарима города

Семей. 2016;1(73):111-114).

Serafimovich M.V., Kirillov V.Yu., Stikhareva T.N., Manabaeva A.U., Daulenova M.Zh. Recommendations on the technology of *in vitro* propagation of Altai sibirea (Rekomendatsii po tekhnologii razmnozheniya metodom in vitro sibirki altaiskoy). Kokshetau: World of Printing, IE "Ustyugova"; 2017. [in Russian] (Серафимович М.В., Кириллов В.Ю., Стихарева Т.Н., Манабаева А.У., Дауленова М.Ж. Рекомендации по

технологии размножения методом *in vitro* сибирки алтайской (Sibiraea altaiensis). Кокшетау: Мир печати, ИП Устюгова; 2017).

Serafimovich M.V., Kirillov V.Yu., Stikhareva T.N. Adaptation of Sibiraea altaiensis plants obtained in vitro to open ground conditions (Adaptaciya poluchennyh in vitro rastenij sibirki altajskoj k usloviyam otkrytogo grunta). Conservation of Forest Genetic Resources: Proceedings of the 6th International Conference; 2019 September 16-20; Shchuchinsk, Kazakhstan. Kokshetau: World of Printing, IE "Ustyugova"; 2019. p.201-202. [in Russian] (Серафимович М.В., Кириллов В.Ю., Стихарева Т.Н. Адаптация полученных ін vitro растений сибирки алтайской к условиям открытого грунта. Сохранение лесных генетических ресурсов: материалы 6-ой Международной конференции-совещания; 16-20 сентября 2019 г.; Шучинск, Казахстан. Кокшетау: Мир печати, ИП Устюгова; 2019. С.201-202). URL: http://kazniilha.kz/public/files/2019/9/20/200919_095838_sbornik-mat-6-meghd-konf-sovesch-sohranenie-lesnyh-geneticheskih-resur.pdf [дата обращения: 05.09.2023].

Sokolov P.D. (ed.). Plant resources of the USSR: flowering plants,

their chemical composition, use. Families Hydraginaceae-Haloragaceae. Leningrad: Science; 1987. [in Russianl (Растительные ресурсы CCCP: цветковые химический состав, использование. Семейства Hydraginaceae-Haloragaceae / под ред. П.Д. Соколова. Ленинград: Наука; 1987).

Syeva S.Ya., Ailchieva A.O. Growth and development features of the Altai mountains' endemic Sibiraea altaensis in culture. Bulletin of Altai State Agricultural University. 2014;9(119):55-59. [in Russian] (Сыева С.Я., Аильчиева А.О. Особенности роста и развития эндемика алтая Sibiraea altaensis в культуре. Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2014;9(119):55-59).

Zhao J.-Q., Wang Y.-M., Lv J.-J., Wang S., Mei L.-J, Tao Y.-D. New monoterpenes from stalks and infructescence of *Sibiraea leavigata*. *Phytochemistry Letters*. 2016;18:1-4. DOI: 10.1016/j. phytol.2016.08.016

Zhao J.-Q., Wang Y.-M., Wang Q.-L., Shao Y., Shib Y.-P., Mei L.-J., Tao Y.-D. Three new monoterpene glycosides from *Sibiraea laevigata* (L.) Maxim. *Phytochemistry Letters*. 2017;19:176-180.

DOI: 10.1016/j.phytol.2017.01.002

Информация об авторах

Мария Вячеславовна Серафимович, младший научный сотрудник, лаборатория биохимии и молекулярной биологии, Биологический Институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050 Россия, Томск, проспект Ленина, 36, masha serafimovich@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-4409-7162

Марина Васильевна Ефимова, кандидат биологических наук, доцент, кафедра физиологии растений, биотехнологии и биоинформатики, Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050 Россия, Томск, проспект Ленина, 36, stevmv555@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-9703-9304

Information about the authors

Maria V. Serafimovich, Junior Researcher, Laboratory of Biochemistry and Molecular Biology, the Biological Institute, National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050 Russia, masha_serafimovich@mail.ru, https://orcid.org/0009-0008-4409-7162

Marina V. Efimova, Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Department of Plant Physiology, Biotechnology and Bioinformatics, Biological Institute, National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050 Russia, stevmv555@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-9703-9304

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 08.09.2023; одобрена после рецензирования 28.02.2024; принята к публикации 21.03.2024.

The article was submitted on 08.09.2023; approved after reviewing on 28.02.2024; accepted for publication on 21.03.2024.

Краткое сообщение УДК 575.11:575.162 DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1-04 (CC) BY

Апробация STS-маркера к гену *Nud1* для отбора голозерных гибридов ячменя

А. М. Короткова¹, Т. В. Кукоева¹, И. В. Тоцкий¹, Ю. Н. Григорьев², О. Ю. Шоева¹

¹Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

²Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, Сибирский научно-исследовательский институт растениеводства и селекции – филиал ИЦиГ СО РАН, Новосибирская область, р.п. Краснообск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Олеся Юрьевна Шоева, olesya ter@bionet.nsc.ru

Актуальность. Голозерный ячмень является перспективной продовольственной культурой. Для увеличения его производства необходима активная селекционная работа по созданию высокопродуктивных сортов. Целью представленной работы является апробация STS-маркера к гену Nudl, контролирующему пленчатость, для отбора голозерных гибридов ячменя. Материалы и методы. Генотипирование 112 гибридов популяции F₂, полученной с помощью скрещивания голозерного черноколосого сорта 'Jet' и пленчатого белоколосого сорта 'Эльф', проводили с помощью праймеров wF2 и kR1, либо tR2, в режиме обычной ПЦР, которая позволила амплифицировать фрагменты рецессивного, либо доминантного аллелей гена Nudl, соответственно, а также в режиме мультиплексной ПЦР, позволяющей одновременно амплифицировать фрагменты и доминантного, и рецессивного аллелей гена Nudl. Данные генотипирования сопоставляли с фенотипами гибридов. Результаты и обсуждение. Показана возможность использования мультиплексной ПЦР с набором праймеров wF2, kR1, tR2 для выявления доминантных и рецессивных аллелей гена Nudl в гибридном материале. Однако, если наблюдаемая частота гибридов гомозиготных по рецессивному аллелю nudl почти полностью соответствовала их ожидаемой частоте при моногенном типе наследования, то явное преобладание гомозигот по доминантному аллелю Nudl и недостаток гетерозигот по сравнению с ожидаемыми частотами гибридов этих групп указывает на ошибочную идентификацию части гетерозигот как доминантных гомозигот, что нужно учитывать при отборе пленчатых форм с помощью генотипирования. Заключение. STS-маркер, амплифицируемый с помощью праймеров wF2, kR1, tR2, возможно использовать для отбора рецессивных гомозигот nudlnudl из гибридных популяций, однако для более надежной идентификации гетерозигот и гомозигот по доминантному аллелю гена Nudl необходим дополнительный анализ.

Ключевые слова: ДНК-маркер, гибриды, маркер-опосредованная селекция, мультиплексная ПЦР

Благодарности: Авторы выражают благодарность Генераловой Галине Владимировне и Захаровой Ольге Викторовне за помощь в работе. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-76-10024. Короткова А.М. поддержана бюджетным проектом FWNR-2022-0007.

Для цитирования: Короткова А.М., Кукоева Т.В., Тоцкий И.В., Григорьев Ю.Н., Шоева О.Ю. Апробация STS-маркера к гену *Nudl* для отбора голозерных гибридов ячменя. *Биотехнология и селекция растений*. 2024;7(1):43-51. DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1-04

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.

© Короткова А.М., Кукоева Т.В., Тоцкий И.В., Григорьев Ю.Н., Шоева О.Ю., 2024

Brief communication

DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1-04

Testing of the STS-marker for the *Nud1* gene for the selection of naked barley hybrids

Anna M. Korotkova¹, Tat'yana V. Kukoeva¹, Igor V. Totsky¹, Yurij N. Grigoriev², Olesya Yu. Shoeva¹

¹Federal Research Center Institute of Cytology and Genetics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia ²Federal Research Center Institute of Cytology and Genetics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Siberian Research Institute of Plant Cultivation and Breeding – Branch of the ICG SB RAS, Novosibirsk region, Krasnoobsk, Russia

Corresponding author: Olesya Yu. Shoeva, olesya_ter@bionet.nsc.ru

Background. Naked barley is a promising food crop. To enhance its production, active breeding is required to create productive varieties. The purpose of this study was to test the STS-marker for the Nudl gene controlling the hulled phenotype, and use it for the production of naked barley hybrids. Materials and methods. Genotyping of 112 F₂ hybrids obtained by crossing the naked black variety 'Jet' and the hulled white variety 'Elf' was carried out using wF2 and kR1, or tR2 primers in the regular PCR mode to amplify the recessive or dominant alleles of the Nudl gene, respectively, and also in the multiplex PCR mode, which allows simultaneous amplification of both dominant and recessive alleles of the Nudl gene. The genotyping data were compared with those on phenotypes of hybrids. Results and discussion. The possibility of using multiplex PCR with a set of primers wF2, kR1, and tR2 for identifying dominant and recessive alleles of the Nudl gene in hybrid material has been demonstrated. However, while the observed number of hybrids homozygous for the recessive allele nudl almost completely corresponded to their expected number, the clear predominance of homozygotes for the dominant allele Nudl and the lack of heterozygotes compared to the expected number of hybrids of these groups indicates erroneous identification of some heterozygotes as dominant homozygotes, which must be taken into account during selection of hulled barleys by genotyping. Conclusions. The STS-marker amplified by primers wF2, kR1, and tR2, can be used to select recessive homozygotes nudlnudl from hybrid populations, however, additional analysis is required for a more reliable identification of heterozygotes and homozygotes for the dominant allele of the Nudl gene.

Keywords: DNA-marker, hybrids, marker-assisted breeding, multiplex PCR

Acknowledgments: The authors express their gratitude to Galina Vladimirovna Generalova and Olga Viktorovna Zakharova for their assistance in the work. This study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 21-76-10024. The work of A.M. Korotkova was supported by the Budget Project FWNR-2022-0007.

For citation: Korotkova A.M, Kukoeva T.V., Totsky I.V., Grigoriev Yu.N., Shoeva O.Yu. Testing of the STS-marker for the *Nud1* gene for the selection of naked barley hybrids. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2024;7(1):43-51. (In Russ.). DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1-04

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, and their employers.

© Korotkova A.M, Kukoeva T.V., Totsky I.V., Grigoriev Yu.N., Shoeva O.Yu., 2024

Введение

Ячмень является одной из древнейших зерновых культур, выращиваемых человеком. Несмотря на то, что эта культура обладает высокой пищевой ценностью, в настоящее время ячмень используется в основном для производства солода, пива и корма для животных. Однако в последние годы возрождается интерес к использованию ячменя в качестве продукта питания для человека. Особое внимание привлекает голозерный ячмень, у которого цветковые чешуи не прирастают к зерну, в отличие от пленчатого ячменя, имеющего плотно сросшиеся с зерновками цветковые чешуи. Зерно голозерных сортов ячменя превосходит зерно пленчатых сортов по содержанию общего белка, незаменимых аминокислот, витаминов и минералов (Meints, Hayes, 2020), а повышенное содержание водорастворимых β-глюканов делает его перспективным сырьем для производства функциональных продуктов питания (Polonskiy, Sumina, 2013). Кроме этого, зерно голозерного ячменя имеет повышенную кормовую ценность. Так, добавление в рацион птицы зерна голозерных сортов ячменя повышало мясную продуктивность гусят-бройлеров и яичную продуктивность несушек перепела (Gryaznov, 2015).

Несмотря на явное превосходство голозерного ячменя по химическому составу зерна, его урожайность уступает пленчатым аналогам, в связи с чем он не приобретает популярности и широкого распространения (Meints, Hayes, 2020). Для решения этой проблемы необходима активная селекционная работа по созданию высокопродуктивных сортов голозерного ячменя, пригодных для выращивания в различных почвенно-климатических зонах (Madakemohekar et al., 2018).

Ранее было показано, что основным геном, контролирующим признак голозерности у ячменя, является ген Nud1, картированный на длинном плече хромосомы 7Н. Он кодирует транскрипционный фактор из семейства ERF, который регулирует биосинтез липидов, обеспечивающих срастание плодовых и цветковых чешуй зерновки (Taketa et al., 2008). Пленчатость зерновки является доминантным признаком (Nud1), голозерность - рецессивным (nud1), обусловленным делецией почти 17 тысяч пн, перекрывающей ген Nud1 и прилежащие районы. Известно четыре аллеля гена Nudl: nudl.a, nud1.b и nud1.c, полученных с помощью мутагенеза (Taketa et al., 2008), а также nud1.g, выявленного среди образцов голозерного ячменя тибетского происхождения (Yu et al., 2016). Предполагается, что рецессивный аллель nud1 отвечает за отсутствие липидного слоя между перикарпием зерновки и цветковыми чешуями, что обеспечивает их свободное разделение при обмолоте. Однако биосинтез липидов - сложный многоступенчатый процесс, в котором участвуют сотни генов. Кроме того, существует обширное генетическое разнообразие голозерных сортов ячменя из разных географических регионов. При проведении GWAS анализа (от англ. genome-wide association studies) у этих сортов были выявлены дополнительные гены, которые были связаны с адаптацией к условиям произрастания, но не с голозерным фенотипом (Lukina et al., 2022). Дополнительный поиск направлен на выявление совместного наследования гена Nud1 с локусами, определяющими экологическую адаптацию ячменя из различных регионов. На основе данных секвенирования локуса Nudl были разработаны праймеры wF2, kR1, и tR2, с помощью которых можно выявить фрагмент аллельного варианта гена Nud1, характеризующийся делецией в 17 тысяч пн, которая обуславливает голозерный фенотип (рис. 1). Разработанный STS-маркер (от англ. Sequence-Tagged Sites) был использован для генотипирования различных коллекций ячменя. Так, при генотипировании 259 образцов, 100 голозерных имели выявленную делецию, тогда как 159 пленчатых ее не имели (Taketa et al., 2008).

Однако, помимо основного локуса на хромосоме 7Н, ассоциативный анализ (GWAS) выявил у голозерных форм локусы на хромосомах 2H, 3H и 6H, которые были специфичны для отдельных выборок, отличающихся географическим происхождением и формой колоса (Wabila et al., 2019). ПЦР-анализ с использованием разработанных праймеров wF2, kR1, tR2 и секвенирование ДНК образцов ячменя, используемых в ассоциативном анализе, показали, что среди 90 голозерных образцов делеция 17 тысяч пн, включая ген Nud1, присутствует у 89. Делеция не была обнаружена лишь у одного из голозерных образцов эфиопского происхождения, однако он имел промежуточный фенотип с частично прилегающими пленками. Все проанализированные пленчатые образцы в количестве 435 штук не имели выявленной делеции. Таким образом, наличие делеции является диагностическим признаком голозерных образцов. При этом выявленные дополнительные локусы на хромосомах 2H, 3H и 6H, по-видимому, не связаны напрямую с голозерностью. Предполагается, что эти локусы представляют собой генетические следы отбора по другим адаптивным или хозяйственно ценным признакам в различных географических группах голозерного ячменя (Wabila et al., 2019).

Разработанные праймеры (Taketa et al., 2008) показали высокую диагностическую эффективность при анализе коллекционных образцов ячменя. Однако, поскольку при амплификации с их помощью доминантных и рецессивных аллелей гена *Nudl* образуются ПЦР-продукты различной длины (853 и 785 пн, соответственно), предложенные праймеры представляют собой перспективные ДНК-маркеры для генотипирования не только коллекционного, но и селекционного гибридного материала. При совместном использовании комбинации из трех праймеров возможно выявить доминантные и рецессивные аллели гена *Nudl* как в гомозиготном, так и в гетерозиготном состоянии. В представленном исследовании была впервые проведена апробация STS-маркера, разработанного на основании нуклеотидной последовательности гена

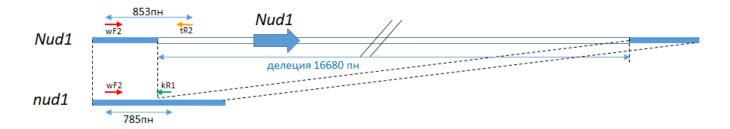


Рис. 1. Схематическое изображение доминантного и рецессивного аллелей гена *Nud1*, контролирующего признак пленчатости у ячменя.

Места отжига праймеров для амплификации аллелей гена *Nud1* показаны разноцветными стрелками, указаны длины ожидаемых ПЦР-продуктов в парах нуклеотидов (по Taketa et al., 2008).

Fig. 1. Schematic representation of the dominant and recessive alleles of the *Nud1* gene controlling the hulled phenotype of barley.

The annealing sites of primers for the amplification of the *Nud1* gene alleles are shown by arrows of different color; the length of the expected PCR products is indicated in base pairs (according to Taketa et al., 2008).

Nud1 и его окружения, для генотипирования популяции гибридных растений ячменя, расщепляющейся по признаку пленчатость/голозерность.

Материалы и методы

Растительный материал. Для апробации ДНК-маркера, представляющего собой фрагмент гена Nud1, использовали гибридную популяцию, полученную в результате скрещивания голозерного сорта 'Jet' (к-18703, ВИР) с черной окраской зерновки и пленчатого белоколосого сорта 'Эльф' (к-30174, ВИР), являющихся донорами генов устойчивости к пыльной головне Run6 и Run8, соответственно (Pomortsev et al., 2000; Bechtold, 2017). Популяция была разработана для пирамидирования генов устойчивости к пыльной головне. Она насчитывала 112 гибридных растений поколения F₂. Растения выращивали в гидропонной теплице ИЦиГ СО РАН (Новосибирск), при созревании зерновок у растений учитывали признак пленчатость/голозерность.

Генотипирование с помощью ПЦР. ДНК гибридных растений выделяли из молодых листьев с помощью методики, предложенной Е. Плашке с соавторами (Plaschke et al., 1995). Оценку качества и количества выделенной ДНК производили с помощью аналитического электрофореза с маркером длины фрагментов 100 bp plus ladder (BIORON, GmbH, Германия). ДНК анализировали с помощью ПЦР с использованием STS-маркера, амплифицированного с использованием прямого праймера wF2 и двух обратных праймеров kR1 и tR2 (Taketa et al., 2008). ПЦР проводили в реакционной смеси объемом 20 мкл, содержащей 5 мкл ДНК, 1,8 мМ MgCl₂, 6 мкл H₂O, по 0,2 мМ каждого дНТФ, по 1 мкМ праймеров wF2 и kR1 (I), либо tR2 (II), специфически амплифицирую-

щих фрагменты рецессивного, либо доминантного аллелей гена Nud1, соответственно, либо (III) 1 мкМ прямого wF2 и двух обратных праймеров kR1 и tR2 по 0,5 мМ каждого, амплифицирующих одновременно фрагменты рецессивного и доминантного аллелей гена Nudl (табл. 1, см. рис. 1), 1 ед. ДНК-полимеразы Тад в амплификаторе в режиме TOCHDOWN: 13 циклов: прогрев реакционной смеси – 2 минуты при 94°C, денатурация – 15 секунд при 94°C, отжиг матрицы с праймерами – 30 секунд при 65° С с понижением на 0.7° С/цикл), полимеризация – 45 с при 72°C; число циклов – 24: денатурация – 15 секунд при 94°C, отжиг матрицы с праймерами – 30 секунд при 56°C, полимеризация – 30 с при 72°C; финальная элонгация для достраивания всех одноцепочечных ПЦР-фрагментов ДНК - 5 минут при 72°С. Продукты амплификации анализировали с помощью электрофореза в 2% агарозном геле и фотографировали в проходящем УФ-свете с помощью гель-документирующей системы Gel Doc XR+ (Bio-Rad, CIIIA).

Результаты

Апробация STS-маркера гена *Nud1* в мультиплексной ПЦР. Для апробации STS-маркера, разработанного на основании нуклеотидной последовательности гена *Nud1* и его окружения, использовали гибриды второго поколения F₂ из популяции 'Jet' × 'Эльф'. В качестве примера на рисунке 2 приведены электрофореграммы продуктов ПЦР, полученных при амплификации ДНК родительских форм и 13 гибридов этой популяции с помощью трех комбинаций праймеров. С помощью праймеров wF2 и tR2 с использованием ДНК индивидуальных растений, в случае всех пленчатых образцов были получены ПЦР-продуты длиной 853 пн, соответствующие доминантному аллелю *Nud1*, тогда как в случае голозерных

Таблица 1. Праймеры и их комбинации для амплификации рецессивного и доминантного аллелей гена *Nud1* по отдельности (комбинации I и II), либо совместно (III) (по Taketa et al., 2008)

Table 1. Primers and their combinations for the amplification of recessive and dominant alleles of the *Nud1* gene separately (combinations I and II), or together (III) (according to Taketa et al., 2008)

Комбинация праймеров/ Primer combination	Название праймера/ Primer name	Структура праймера/ Primer structure, 5'→3'	Длина ПЦР-продукта, пн/ PCR product length, bp	Аллели/ Alleles	
I	wF2	gettgeagttaeagagetaetaetae	785	nud1	
	kR1	cctcaccacttaaccatgtctg	783		
II	wF2	gcttgcagttacagagctactactac	853	Nud1	
	tR2	geggteetttettteeagt	833		
III	wF2	gcttgcagttacagagctactactac		Nud1, nud1	
	kR1	cctcaccacttaaccatgtctg	785, 853		
	tR2	geggteetttettteeagt			

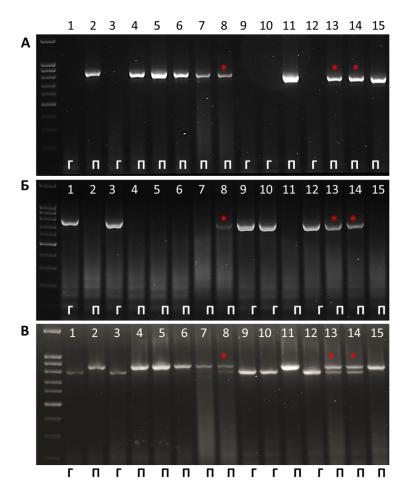


Рис. 2. Электрофореграммы продуктов ПЦР, полученных с использованием комбинаций праймеров wF2 + tR2 (A), wF2 + kR1 (Б) и wF2 + tR2 + kR1 (В) и ДНК сортов 'Jet' (1), 'Эльф' (2) и гибридов поколения F2 (3-15), полученных в результате их скрещивания.

Маркер длины фрагментов ДНК 100 bp нанесен на первую дорожку. Сокращения: Г – голозерный, П – пленчатый

Fig. 2. Electrophoregrams of PCR products obtained using combinations of primers wF2 + tR2 (A), wF2 + kR1 (B), wF2 + tR2 + kR1 (B), and DNA of varieties 'Jet' (1), 'Elf' (2) and F2 hybrids (3-15) from their crossing.

A 100 bp marker was applied to the first row. Abbreviations: Γ – naked, Π – hulled

образцов ПЦР-продуктов получено не было (нуль-аллель) (рис. 2А). При амплификации фрагментов ДНК тех же образцов с помощью праймеров wF2 и kR1, все пленчатые образцы имели нуль-аллель, а голозерные -ПЦР-продукты длиной 785 пн, соответствующие рецессивному аллелю *nud1* (рис. 2Б). Были выявлены три гетерозиготных образца (№8, 13, 14): при использовании ДНК этих растений в качестве матрицы в двух параллельных реакциях были амплифицированы фрагменты доминантного и рецессивного аллелей, соответственно (отмечены красными звездочками на рис. 2А, 2Б). С помощью мультиплексной ПЦР с использованием одного прямого wF2 и двух обратных праймеров kR1, tR2 у этих образцов были одновременно амплифицированы фрагменты обоих аллелей гена Nud1. Наличие двух ПЦР-фрагментов послужило доказательством гетерозиготности трех образцов (отмечены красными звездочками на рис. 2В). Таким образом, используя комбинацию трех праймеров, возможно выявлять обладателей доминантного и рецессивного аллелей одновременно и уже на стадии проростков предсказать фенотип будущего зерна, в том числе определить находится ли ген Nud1 в гомозиготном или гетерозиготном состоянии, тогда как по фенотипу отличить пленчатые гомозиготные гибриды от гетерозиготных невозможно.

Генотипирование популяции F_2 'Jet' × 'Эльф' по гену *Nud1*. Популяция F_2 'Jet' × 'Эльф', расщепляющаяся независимо по признакам пленчатости, окраски колоса, а также устойчивости к пыльной головне, была генотипирована с помощью трех праймеров, позволяющих амплифицировать фрагменты доминантного и рецессивного аллелей гена *Nud1* одновременно. Полученные данные о генотипах были сопоставлены с фенотипом гибридов. Всего было выявлено четыре фенотипических класса гибридов ячменя: черный голозерный, черный пленчатый, белый голозерный, белый пленчатый (рис. 3).



Рис. 3. Фенотипические классы гибридов популяции F₂ 'Jet' × 'Эльф' и их количественные соотношения.

Fig. 3. Phenotypic classes of 'Jet' × 'Elf' F, hybrids and their quantitative ratios.

Расщепление в популяции по признакам окраски зерновки и пленчатости соответствовало моногенному (χ^2 =2,33, p = 0,13 и χ^2 = 3,05, p = 0,08, соответственно) (табл. 2). Так, из 112 гибридов 76 были пленчатыми, а 36 – голозерными. При генотипировании этих гибридов с помощью маркера к гену Nudl было выявлено три генотипических класса NudlNudl, Nudlnudl и nudlnudl в cooтношении 39:44:29, соответственно. Однако наблюдаемое расщепление по генотипу не соответствовало ожидаемому моногенному расщеплению 1:2:1. Число рецессивных гомозигот по гену Nudl почти полностью совпадала с ожидаемым количеством гомозигот (29 против 28), тогда как в классе гетерозигот наблюдалось меньшее количество гибридов по сравнению с ожидаемым их количеством (44 против 56), а в классе доминантных гомозигот, напротив, наблюдалось большее количество растений по сравнению с ожидаемым их количеством (39 против 28). На основе анализа расщепления по генотипу можно предположить, что некоторые гетерозиготы могли быть ошибочно идентифицированы как доминантные гомозиготы. Однако, если объединить в одну группу доминантные гомозиготные и гетерозиготные гибриды, расщепление по фенотипу будет соответствовать ожидаемому моногенному 3:1.

Таким образом, с помощью мультиплексной ПЦР с использованием праймеров, специфичных для аллелей гена Nudl (Taketa et al., 2008), можно достаточно точно выявить голозерные гибриды, гомозиготные по аллелю nudl, а также пленчатые гомозиготные по аллелю Nudl и гетерозиготные гибриды, однако часть гетерозигот может быть ошибочно идентифицирована как доминантные гомозиготы, что необходимо учитывать при отборе пленчатых форм.

Таблица 2. Расщепление в популяции F_2 по признакам цвета колоса и пленчатости/голозерности Table 2. Segregation in the F_2 population for spike color and hulled/naked phenotype

Оценка фенотипа/	Признак/ Trait	Группы/ Groups	Число растений/ Number of plants		Расщепл./	X ²		
Phenotype evaluation			Набл./ Observed	Ожид./ Expected	Bcero/ Total	Segregation ratio	A -	p<
визуальное фенотипирование	черный/	Blp1- (Y)	91	84	112 3:1	2,33	0,13	
	белый	blp1blp1 (Б)	21	28		3.1	2,33	0,13
	пленчатый/ голозерный	$Nud1$ - (Π)	76	84	112	3:1	3,05	0,08
		$nud1nud1$ (Γ)	36	28				
	пленчатый/ голозерный	$Nud1Nud1$ (Π)	39	28	112	1:2:1	6,93	0,03
		$Nud1nud1 (\Pi)$	44	56				
генотипирование с помощью ДНК-		$nud1nud1$ (Γ)	29	28				
маркеров	пленчатый/ голозерный	Nud1Nud1 + Nud1nud1 (Π)	83	84	112	3:1	0,05	0,83
		$nud1nud1$ (Γ)	29	28				

Обсуждение

Голозерный ячмень является перспективной продовольственной культурой. Однако его урожайность уступает пленчатым аналогам, в связи с чем он не приобретает популярности и широкого распространения (Meints, Hayes, 2020). Тем не менее, существует стойкий интерес к выведению высокоурожайных голозерных сортов, в том числе с использованием современных методов генетического редактирования (Gerasimova et al., 2020; Meints, Hayes, 2020; Tetyannikov, Bome, 2020). При классической селекции отбор голозерных гибридов проводят на стадии созревания зерна, что делает выведение таких сортов трудоемким и длительным процессом. В частности, если в этом процессе участвуют пленчатые формы, ввиду моногенного наследования и рецессивности признака голозерности, три четверти пленчатых гибридов

поколения F_2 будут отбракованы лишь после достижения стадии взрослого растения, при этом могут быть отбракованы, в том числе, гетерозиготы NudInudI с удачными комбинациями генов, контролирующими ценные признаки, среди потомков которых возможно отобрать голозерные гибриды в последующих поколениях.

Предложенные праймеры для выявления делеции в 17 тысяч пн, которая отличает доминантный аллель гена *Nud1* от рецессивного *nud1*, были ранее использованы для генотипирования коллекционных образцов ячменя (Taketa et al., 2008). В настоящем исследовании данные праймеры, позволяющие амплифицировать кодоминантный STS-маркер, были использованы для генотипирования гибридных растений. В целом показано, что с помощью мультиплексной ПЦР с использованием этих праймеров возможно достаточно точно выявить голозерные гибриды, гомозиготные по аллелю *nud1*, однако неко-

торые пленчатые гетерозиготные гибриды в работе были ошибочно идентифицированы как доминантные гомозиготы, на что указывает отклонение наблюдаемого расщепления по генотипу в популяции гибридов от ожидаемого моногенного. Одной из возможных причин отклонения наблюдаемого расщепления от ожидаемого могут являться замены в местах отжига подобранных праймеров, в результате чего происходит снижение эффективности амплификации одного из аллелей, в приведенном случае – фрагмента рецессивного аллеля *nud1*.

Помимо отбора голозерных гибридных растений ячменя, при селекции существует необходимость перенести ценные гены от голозерных форм пленчатым, как, например, ген устойчивости к пыльной головне *Run6* голозерного сорта 'Jet'. При использовании для решения этой задачи разработанных праймеров (Taketa et al., 2008) необходимо учитывать то, что часть отобранных с помощью генотипирования пленчатых гомозигот может в итоге оказаться гетерозиготами.

Подбор альтернативного набора праймеров к выявленным аллельным вариантам гена *Nud1* с привлечением данных пангенома ячменя (Jayakodi et al., 2020) позволит более эффективно дифференцировать гомозиготные и гетерозиготные по доминантному аллелю гена *Nud1* пленчатые гибриды.

References/Литература

- Bechtold N.P. Study of the source material of spring barley for breeding for resistance to smut diseases in the forest-steppe of the Ob region (Izuchenie iskhodnogo materiala yarovogo yachmenya dlya selektsii na ustoichivost' k golovnevym zabolevaniyam v lesostepi Priob'ya) [dissertation]. Barnaul: ASAU; 2017. [in Russian] (Бехтольд Н.П. Изучение исходного материала ярового ячменя для селекции на устойчивость к головневым заболеваниям в лесостепи Приобья: дис. ... канд биол. наук. Барнаул: АГАУ; 2017).
- Gerasimova S.V., Hertig C., Korotkova A.M. Kolosovskaya E.V., Otto I., Hiekel S., Kochetov A.V., Khlestkina E.K., Kumlehn J. Conversion of hulled into naked barley by Cas endonuclease-mediated knockout of the *NUD* gene. *BMC Plant Biology*. 2020;20 Suppl 1:255. DOI: 10.1186/s12870-020-02454-9
- Gryaznov A.A. Hulless barley in poultry feeding. Animal agriculture and veterinary medicine. 2015;2(17):7-11. [in Russian] (Грязнов А.А. Голозерные сорта ячменя в кормлении птицы. Животноводство и ветеринарная медицина. 2015;2(17):7-11).
- Jayakodi M., Padmarasu S., Haberer G., Bonthala V.S., Gundlach H., Monat C, Lux T., Kamal N., Lang D., Himmelbach A., Ens J., Zhang X.-Q., Angessa T.T., Zhou G., Tan C., Hill C., Wang P., Schreiber M., Boston L.B., Plott C.,

- Jenkins J., Guo Y., Fiebig A., Budak H., Xu D., Zhang J., Wang C., Grimwood J., Schmutz J., Guo G., Zhang G., Mochida K., Hirayama T., Sato K., Chalmers K.J., Langridge P., Waugh R., Pozniak C.J., Scholz U., Mayer K.F.X., Spannag M., Li C., Mascher M., Stein N. The barley pan-genome reveals the hidden legacy of mutation breeding. *Nature*. 2020;588:284-289. DOI: 10.1038/s41586-020-2947-8
- Lukina K.A., Kovaleva O.N., Loskutov I.G. Naked barley: taxonomy, breeding, and prospects of utilization. *Vavilov Journal of Genetics* and Breeding. 2022;26(6):524-536. DOI: 10.18699/VJGB-22-64
- Madakemohekar A.H., Talekar N.S., Kamboj A.D., Thakur G. Scope of hulless barley (*Hordeum vulgare* L.) as a nutritious and medicinal food: a review. *Acta Scientific Agriculture*. 2018;2(12):11-13.
- Meints B., Hayes P.M. Breeding naked barley for food, feed, and malt. In: I. Goldman (ed.). Plant Breeding Reviews. Vol. 43. Hoboken (New Jersey, USA): Wiley; 2020. p.95-119. DOI: 10.1002/9781119616801.ch4
- Polonskii V.I., Sumina A.V. β-Glucans content as a perspective trait in the barley breeding for foodstuff use (review). Agricultural Biology. 2013;5:30-43. [in Russian] (Полонский В.И., Сумина A.B. Содержание β-глюканов В зерне как перспективный признак при селекции ячменя на пищевое иностранной использование (обзор литературы). Сельскохозяйственная биология. 2013;5:30-43).
- Pomortsev A.A., Tereshchenko N.A., Ofitserov M.V., Pukhalskiy V.A. Localization of loose smut resistance genes, Run6, Run8, and Run12 on barley chromosomes. In: S. Logue (ed.). Barley genetics VIII: proceedings of the 8th International Barley Genetics Symposium; 2000 October 22-27; Adelaide Convention Centre, Adelaide, South Australia. L. Malcolm (comp.). Glen Osmond, South Australia: Adelaide University; 2000. Vol. 2. p.163-165. Available from: https://catalogue.nla.gov.au/catalog/2374225 [accessed Nov. 11, 2023].
- Plaschke J., Ganal M.W., Röder M.S. Detection of genetic diversity in closely related bread wheat using microsatellite markers. *Theoretical and Applied Genetics*. 1995;91:1001-1007.
- Taketa S., Amano S., Tsujino Y., Sato T., Saisho D., Kakeda K., Nomura M., Suzuki T., Matsumoto T., Sato K., Kanamori H., Kawasaki S., Takeda K. Barley grain with adhering hulls is controlled by an ERF family transcription factor gene regulating a lipid biosynthesis pathway. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2008;105:4062-4067. DOI: 10.1073/pnas.0711034105
- Tetyannikov N.V., Bome N.A. Sources of characters useful for breeding in hulless barley. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding.* 2020;181(3):49-55. [in Russian] (Тетянников Н.В., Боме Н.А. Источники ценных признаков для селекции голозерного ячменя. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции.* 2020;181(3):49-55). DOI: 10.30901/2227-8834-2020-3-49-55
- Wabila C., Neumann K., Kilian B. Radchuk V., Graner A. A tiered approach to genome-wide association analysis for the adherence of hulls to the caryopsis of barley seeds reveals footprints of selection. BMC Plant Biology. 2019;19:95. DOI: 10.1186/ s12870-019-1694-1
- Yu S., Long H., Deng G., Pan Z., Liang J., Zeng X., Tang Y., Tashi N., Yu M.A Single nucleotide polymorphism of *Nud* converts the caryopsis type of barley (*Hordeum vulgare* L.). *Plant Molecular Biology Reporter*. 2016;34:242-248. DOI: 10.1007/s11105-015-0911-9

Информация об авторах

Анна Михайловна Короткова, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЦиГ СО РАН), 630090 Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 10, korotkova@bioent.nsc.ru, https://orcid.org/0000-0003-1540-1491

Татьяна Владимировна Кукоева, старший лаборант, Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЦиГ СО РАН), 630090 Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 10, kukoeva@bionet.nsc.ru, https://orcid.org/0000-0002-1425-7849

Игорь Васильевич Тоцкий, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЦиГ СО РАН), 630090 Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 10, totsky@g.nsu.ru, https://orcid.org/0000-0001-5565-9097

Юрий Николаевич Григорьев, старший научный сотрудник, Лаборатория селекции, семеноводства и технологии возделывания полевых культур, Сибирский научно-исследовательский институт растениеводства и селекции – филиал Федерального исследовательского центра Института цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук (СибНИИРС – филиал ИЦиГ СО РАН), 630501 Россия, Новосибирская область, р.п. Краснообск, ул. С-200, зд. 5/1, uriy42yury@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-4910-6928

Олеся Юрьевна Шоева, кандидат биологических наук, заведующая лабораторией, Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЦиГ СО РАН), 630090 Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 10, olesya ter@bionet.nsc.ru, https://orcid.org/0000-0001-5289-8631

Information about the authors

Anna M. Korotkova, Junior Researcher, Federal Research Center Institute of Cytology and Genetics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10, Academician Lavrentyev Avenue, Novosibirsk, 630090 Russia, korotkova@bioent.nsc.ru, https://orcid.org/0000-0003-1540-1491

Tat'yana V. Kukoeva, Senior Laboratory Assistant, Federal Research Center Institute of Cytology and Genetics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Russian Federation, 10, Academician Lavrentyev Avenue, Novosibirsk, 630090 Russia, kukoeva@bionet.nsc.ru, https://orcid.org/0000-0002-1425-7849

Igor V. Totsky, Cand. Sci (Biology), Federal Research Center Institute of Cytology and Genetics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10, Academician Lavrentyev Avenue, Novosibirsk, 630090 Russia, totsky@g.nsu.ru, https://orcid.org/0000-0001-5565-9097

Yurij N. Grigoriev, Senior Researcher, Siberian Research Institute of Plant Production and Breeding, a Branch of the Institute of Cytology and Genetics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, P.O. Box 375, Bldg. 5/1, S-200 Street, Krasnoobsk, Novosibirsk Region, 630501 Russia, uriy42yury@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-4910-6928

Olesya Yu. Shoeva, Cand. Sci. (Biology), Head of Laboratory, Federal Research Center Institute of Cytology and Genetics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10, Academician Lavrentyev Avenue, Novosibirsk, 630090 Russia, olesya_ter@bionet.nsc.ru, https://orcid.org/0000-0001-5289-8631

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 12.01.2024; одобрена после рецензирования 12.02.2024; принята к публикации 28.02.2024.

The article was submitted on 12.01.2024; approved after reviewing on 12.02.2024; accepted for publication on 28.02.2024.

Краткое сообщение УДК 635:631.52:632(470+571)(092) DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1-05



К юбилею селекционера Григория Федоровича Монахоса

К. У. Куркиев^{1,3}, С. Г. Монахос², Е. К. Хлесткина^{3,4}

¹Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Дагестанская опытная станция – филиал ВИР, Дербент, Россия

²Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

³Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия

⁴Вавиловское общество генетиков и селекционеров, Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Киштили Уллубиевич Куркиев, kkish@mail.ru

20 марта 2024 года исполнилось 70 лет выдающемуся российскому селекционеру Григорию Федоровичу Монахосу, руководителю научной школы в области селекции овощных культур. Трудовая, научная и педагогическая деятельность Григория Федоровича на протяжении более сорока лет связана с «Тимирязевкой», нынешним Российским государственным аграрным университетом – МСХА имени К.А. Тимирязева. Григорий Федорович – автор/ соавтор более 70 гибридов овощных культур, из них более 40 – капусты белокочанной. В своей селекционной работе Г.Ф. Монахос уделял наибольшее внимание самым сложным аспектам – генетической устойчивости растений к фитопатогенам и вредителям. Под его руководством защитили диссертации 18 кандидатов наук. Г.Ф. Монахос – соавтор более 130 публикаций, в том числе учебника и учебных пособий. Григорий Федорович – член редакционных коллегий научных журналов «Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии» и «Картофель и овощи».

Ключевые слова: Brassica, гибридная селекция, капуста, овощные культуры, устойчивость к болезням

Для цитирования: Куркиев К.У., Монахос С.Г., Хлесткина Е.К. К юбилею селекционера Григория Федоровича Монахоса. *Биотехнология и селекция растений.* 2024;7(1):52-57. DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1-o5

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

© Куркиев К.У., Монахос С.Г., Хлесткина Е.К., 2024

Brief communication

DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1-05

On the anniversary of the breeder Grigory Fedorovich Monakhos

Kishtili K. Kurkiev^{1,3}, Sokrat G. Monakhos², Elena K. Khlestkina^{3,4}

N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), Dagestan Experimental Station – branch of VIR, Derbent, Russia

²Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

³N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), St. Petersburg, Russia

⁴Vavilov Society of Geneticists and Breeders, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: Kishtili K. Kurkiev, kkish@mail.ru

On March 20, 2024, an outstanding Russian breeder Grigory Fedorovich Monakhos, Head of a scientific school in the field of vegetable breeding, turned 70 years old. The labor, scientific and pedagogical activities of Grigory Fedorovich for more than forty years have been associated with «Timiryazevka" – the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy. Grigory Fedorovich is the author/ co-author of more than 70 hybrids of vegetable crops, of which more than 40 are of white cabbage. In his breeding work, G.F. Monakhos paid the greatest attention to the most complex aspects: the genetic resistance of plants to phytopathogens and pests. Under his leadership, 18 candidates of science defended their theses. G.F. Monakhos is a co-author of more than 130 publications, including a textbook and educational manuals. Grigory Fedorovich is a member of the editorial boards of scientific journals "Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy" and "Potato and Vegetables".

Keywords: Brassica, hybrid breeding, cabbage, vegetable crops, disease resistance

For citation: Kurkiev K.U., Monakhos S.G., Khlestkina E.K. On the anniversary of the breeder Grigory Fedorovich Monakhos. *Plant Biotechnology and Breeding.* 2024;7(1):52-57. (In Russ.). DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1-05

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, and their employers.

© Kurkiev K.U., Monakhos S.G., Khlestkina E.K., 2024

Григорий Федорович Монахос – известный ученый-селекционер «Тимирязевки», родился 20 марта 1954 года в селе Ново-Крымском Крымского района Краснодарского края. По национальности грек, но русский по духу, обладающий высочайшим патриотическим чувством к своей Родине, России, он посвятил всю свою жизнь служению ей и её народу. Трудовая, научная и педагогическая деятельность Григория Федоровича на протяжении более сорока лет связана с «Тимирязевкой», нынешним Российским государственным аграрным университетом - МСХА имени К.А. Тимирязева. Имея опыт работы агрономом после окончания техникума, он поступил на плодоовощной факультет и через год окунулся, как оказалось позже, с головой и всем своим существом, в научные исследования. Обладая неизменной целеустремленностью, будучи еще стажером и аспирантом кафедры селекции и семеноводства овощных и плодовых культур, он стал основной движущей силой «революции» в отечественной селекции овощных культур. Под научным руководством А.В. Крючкова он подготовил и в 1984 году защитил кандидатскую диссертацию, практическим результатом которой явилось создание первого в СССР гибрида среднеспелой белокочанной капусты F, CБ-3, известного и популярного до настоящего времени. Г.Ф. Монахос является соавтором первого гибрида позднеспелой капусты F, Крюмон, на который получен исторически значимый патент на селекционное достижение под номером №001.

При самом непосредственном участии и руководстве Γ .Ф. Монахоса в Российском государственном аграрном университете — МСХА имени К.А. Тимирязева разработаны оригинальные схемы селекции F_1 гибридов на основе спорофитной самонесовместимости и цитоплазматической мужской стерильности, предложена современная методология селекционного процесса (Monakhos, 2007), создана уникальная генетическая коллекция овощных культур и на их базе множество гибридов, включенных в Государственный реестр Российской Федерации, а также в Госреестры Украины и Республики Беларусь.

Особую ценность и востребованность у производителей и потребителей получили гибриды поздней капусты Крюмон, Экстра, Колобок, Престиж, Орион, Доминанта и Валентина, обладающие высокой лежкостью; три последних способны храниться до июня месяца и содержат аскорбиновой кислоты в 1,2-1,4 раза больше, чем зарубежные аналоги, поэтому являются важным ее источником для большей части населения в зимний период.

В своей селекционной работе Григорий Федорович неустанно делал и продолжает делать упор на самую сложную ее часть – генетическую устойчивость растений к фитопатогенным заболеваниям, физиологическим расстройствам, толерантность к вредителям, а теперь и толерантность к гербицидам (Dzhalilov et al., 1989; Ignatov et al., 2002a, b; Monakhos et al., 1990; 1996; 1997; 2001; 2015; 2019; Monakhos, Terenina, 1998; Monakhos, Ushanov, 1998; Monakhos, Dzhalilov, 2000; Nguyen et al.,

2018; Orynbayev et al., 2019; Zastavnyuk et al., 2022; Zubko et al., 2022). Непосредственно его руками создана серия первых отечественных F, гибридов позднеспелой капусты белокочанной устойчивой к киле, F, Киластоп, F, Барыня, F, Добродей, F, Отличник и раннеспелый F, Приоритет. Несмотря на то, что ранее считалось невозможным создать подобные гибриды, большинство из них кроме устойчивости к киле несут комплексную устойчивость к фузариозному увяданию, толерантность к трипсу и краевому ожогу. В этом проявляется высокая социо-экономическая миссия деятельности и стремления Григория Федоровича, создавшего устойчивые к болезням и вредителям гибриды овощей для конвейерного производства (Monakhos, 2009): сельхозтоваропроизводители имеют возможность, используя семена этих гибридов, гарантировать устойчивое производство для российского населения «здоровых» овощей по «зеленым технологиям». Особое внимание уделяется и разработке технологий для бесперебойного снабжения качественными семенами сельхозтоваропроизводителей (Monakhos et al., 2009b).

Создавая новые гибриды, Григорий Монахос успешно использует прикладную часть самых современных биотехнологических методов селекции - молекулярное генотипирование для детекции генов устойчивости, дифференциации типов цитоплазм, производство удвоенных гаплоидов для ускоренного создания родительских линий для гибридов (Zubko et al., 2019a), эмбриокультуру для интрогрессии генов при отдаленной гибридизации (Gribova et al, 2005; Khrustaleva et al., 2019; Monakhos et al., 2001; Zubko et al., 2018; 2019b) и другие, с удовольствием участвует и поддерживает проекты, связанные с геномным редактированием и геномной селекцией. В этом проявляется его творческая суть, он «горит» новыми научными идеями, у него «нетерпение» к решению селекционных задач, которые для многих кажутся безнадежными.

Глубокие научные знания, упорное трудолюбие и высокий профессионализм позволили ему достичь невероятно высоких результатов в селекции капустных и других важнейших овощных культур, при этом не просто укрепить позиции отечественной селекции, заложенные великими учеными-учителями, профессором Сергеем Ивановичем Жегаловым, профессором Николаем Николаевичем Тимофеевым и профессором Анатолием Васильевичем Крючковым, но поднять её на новый качественный уровень.

Селекция гибридов F_1 капусты с новыми агрономическими свойствами – устойчивостью к фузариозному увяданию, киле, сосудистому бактериозу, толерантностью к трипсу, верхушечному ожогу, с высоким содержанием сахаров и аскорбиновой кислоты в кочане, высокой лежкостью, однородностью по морфологическим признакам, пригодностью к промышленным технологиям возделывания – позволила провести сортосмену в товарном производстве и разработать регламент конвейерного круглогодичного производства и потребления свежей про-

дукции – капусты с высокими биохимическими показателями.

Переход от создания сортов обычных популяций к селекции F_1 гибридов явился генетической предпосылкой перевода массового семеноводства белокочанной капусты на ресурсосберегающую беспересадочную технологию в зоне субтропиков, внедрение и использование которой снизило себестоимость гибридных семян в сравнении с выращиванием в пленочных теплицах в Нечерноземной зоне более чем в 20 раз и обеспечило ежегодное производство в разные годы от 3,5 до 10 тонн семян для российских овощеводов.

Трудно перечесть всё созданное руками Григория Федоровича — за его плечами более 40 гибридов F_1 капусты белокочанной, три краснокочанной, восемь пекинской, два цветной, один брокколи, два дайкона, три перца сладкого, четыре гибрида огурца, пять томата, пять лука репчатого, в том числе с устойчивостью к пероноспорозу — «послужной список», достойный коллектива хороше-

го научно-исследовательского института.

Имя Григория Федоровича широко известно среди ученых-овощеводов и селекционеров не только в нашей стране, но и далеко за ее пределами. Он автор и соавтор более 130 научных работ, в том числе одного учебника, четырех учебных пособий (Monakhos et al., 2009а) и одной монографии (Monakhos, Monakhos, 2009).

За заслуги в агропромышленном производстве, активную общественную работу и большой личный вклад в развитие растениеводства, он удостоен звания «Почетный работник агропромышленного комплекса России», является Лауреатом Премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники.

Поздравляем Григория Федоровича с юбилеем! Желаем крепкого здоровья и долгих плодотворных лет в науке, новых блестящих успехов в селекции гибридов овощных культур, процветания возглавляемой им селекционной школе!



Рис. Григорий Федорович Монахос

(Фото из открытого доступа, URL: https://www.nsss-russia.ru/2020/01/28/net-kile/ [дата обращения: 13.01.2024])

Fig. Grigory Fedorovich Monakhos

(Open access photo from URL: https://www.nsss-russia.ru/2020/01/28/net-kile/ [accessed Jan. 13, 2024])

References/Литература

Dzhalilov F.S., Monakhos G.F., Tivari R.D. Damage caused by black rot disease of cabbage (Vredonosnost' sosudistogo bakterioza kapusty.). Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy. 1989;(3):69-72. [in Russian] (Джалилов Ф.С., Монахос Г.Ф., Тивари Р.Д. Вредоносность сосудистого бактериоза капусты. Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 1989;(3):69-72).

Gribova T.N., Kamionskaya A.M., Monakhos G.F., Skryabin K.G.

Obtaining of *Brassica oleracea* var. *capitata* transgenic plants with novel agrotechnical properties. *Biotekhnologiya*. 2005;(6):12-19. [in Russian] (Грибова Т.Н., Камионская А.М., Монахос Г.Ф., Скрябин К.Г. Создание трансгенных растений капусты белокочанной *Brassica oleracea* var. *capitata* с новыми агротехническими свойствами. *Биотехнология*. 2005;(6):12-19).

Ignatov A., Kuginuki Y., Hida K., Monakhos G., Djalilov F. Xanthomonas campestris, the pathogen of cruciferous and sources of resistance to black rot and leafspots among Brassicacea. Agricultural Biology. 2002a;37(5):75-84. [in

- Russian] (Игнатов А.Н., Кугинуки Я., Хида К., Монахос Г.Ф., Джалилов Ф.С. Патоген крестоцветных Xanthomonas campestris. О создании устойчивых к ксантомонадам растений семейства Brassicacea. Сельскохозяйственная биология. 2002a;37(5):75-84).
- Ignatov A.N., Pozmogova G.V., Monakhos G.F., Djalilov F.S. Avirulence gene from Xanthomonas campestris pv. campestris homologous to the avrBs2 locus is recognized in race-specific reaction by two different resistance genes in Brassicas. Russian Journal of Genetics. 2002b;38(12):1404-1410. DOI: 10.1023/A:1021643907032
- Khrustaleva L., Mardini M., Kudryavtseva N., Alizhanova R., Romanov D., Sokolov P., Monakhos G. The power of genomic in situ hybridization (GISH) in interspecific breeding of bulb onion (Allium cepa L.) resistant to downy mildew (Peronospora destructor [Berk.] Casp.). Plants. 2019;8(2):36. DOI: 10.3390/ plants8020036
- Monakhos G.F. The scheme of cabbage bilinear hybrids development based on self-incompatibility. Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy. 2007;(2):86-93. [in Russian] (Монахос Г.Ф. Схема создания двухлинейных гибридов капустных овощных основе самонесовместимости. культур на Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2007;(2):86-
- Monakhos G.F. Conveyor production of cabbage based on domestic hybrids (Konveyyernoye proizvodstvo kapusty na osnove otechestvennykh gibridov). Vegetable Grower's Bulletin = Vestnik ovoschevoda. 2009;(1):8-12. [in Russian] (Монахос Г.Ф. Конвейерное производство капусты на основе отечественных гибридов. Вестник овощевода. 2009;(1):8-12).
- Monakhos G.F., Dzhalilov F.S. Genetic sources and methods for estimation of brassicas resistance to black rot. Journal of Russian Phytopathological Society. 2000;1:83-88.
- Monakhos G.F., Monakhos S.G. Chinese cabbage Brassica rapa L. Em. Metzg. ssp. *pekinensis* (Lour.) Hanelt: biological characteristics, genetics, breeding and seed production (Kapusta pekinskaya Brassica rapa L. Em. Metzg. ssp. pekinensis (Lour.) Hanelt: biologicheskiye osobennosti, genetika, selektsiya i semenovodstvo). Moscow; 2009. [in Russian] (Монахос Г.Ф., Монахос С.Г. Капуста пекинская Brassica rapa L. Em. Metzg. ssp. pekinensis (Lour.) Hanelt: биологические особенности, генетика, селекция и семеноводство. Москва; 2009).
- Monakhos G.F., Terenina N.S. Genetic sources of resistance to clubroot of crucifers (Plasmodiophora brassicae Wor.) at selecting Pekin cabbage. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 1998;(3):87-93. [in Russian] (Монахос Г.Ф., Теренина Н.С. Генетические источники устойчивости к киле крестоцветных (Plasmodiophora brassicae Wor.) при селекции пекинской капусты. Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 1998;(3):87-93).
- Monakhos G.F., Ushanov A.A. Inheritance of resistance to clubroot (Plasmodiophora brassicae Wor.) in cow cabbage (Brassica oleracea ssp. acephala) strains. Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy. 1998;(2):106-114. [in Russian] (Монахос Г.Ф., Ушанов А.А. Наследование устойчивости к киле (Plasmodiophora brassicae Wor.) у линий листовой капусты (Brassica oleracea ssp. acephala). Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 1998;(2):106-
- Monakhos G.F., Ignatov A.N., Dzhalilov F.S., Tsvetkov I.L., Vishnyakova Kh.M., Dorokhov D.B., Pozmogova G.V., Solovjev A.A. Synthesis of allohexaploid with genome formula AABBCC of Brassica L. genus as donor of resistance to clubroot and vascular bacteriosis of cruciferous plants. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2001;(4):56-68. [in Russian] (Монахос Г.Ф., Игнатов А.Н., Джалилов Ф.С., Цветков И.Л., Вишнякова Х.М., Дорохов Д.Б., Позмогова Г.В., Соловьев А.А. Синтез аллогексаплоида с геномной формулой AABBCC рода Brassica L. как донора устойчивости к киле и сосудистому бактериозу крестоцветных. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2001;(4):56-68).
- Monakhos G.F., Jalilov F.S., Monakhos S.G. Evaluation of resistance of cabbage plants to clubroot (pathogen *Plasmodiophora brassicae* Wor.): educational and methodological manual

- (Otsenka ustoychivosti kapustnykh rasteniy k kile (vozbuditel' Plasmodiophora brassicae Wor.): uchebno-metodicheskoye posobiye). Moscow; 2009a. [in Russian] (Μοнахос Γ.Φ., Джалилов Ф.С., Монахос С.Г. Оценка устойчивости капустных растений к киле (возбудитель – Plasmodiophora brassicae Wor.): учебно-методическое пособие. Москва; 2009a).
- Monakhos G.F., Gzalilov F.S., Suddenko V.G. Indirect method for evaluating the resistance of cabbage to soft rot. Izvestiva of Тітуагеч Agricultural Academy. 1996;(1):152-157. [in Russian] (Монахос Г.Ф., Джалилов Ф.С., Судденко В.Г. Косвенный метод оценки устойчивости капусты к слизистому бактериозу. Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 1996;(1):152-157).
- Monakhos G.F., Dzhalilov F.S.-U., Suddenko V.G. Method for selecting of cabbage plants resistant to mucous bacteriosis. Russian Federation; breeding achievement patent number: RU 2083090 CI; 1997. [in Russian] (Монахос Г.Ф., Джалилов Ф.С.-У., Судденко В.Г. Способ отбора растений капусты, устойчивых к слизистому бактериозу. Российская Федерация; патент на селекционное достижение № RU 2083090 CI; 1997). URL: https://patents.s3.yandex.net/ RU2083090C1_19970710.pdf [дата обращения: 13.01.2024].
- Monakhos G.F., Dzhalilov F.S., Tiwary R.D. Inheritance of resistance to vasobacteriosis in self-incompatible lines of late maturing cabbage. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 1990;(4):86-91. [in Russian] (Монахос Г.Ф., Джалилов Ф.С., Тивари Р.Д. Наследование устойчивости к сосудистому бактериозу у самонесовместимых линий позднеспелой белокочанной Известия капусты. Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 1990;(4):86-91).
- Monakhos G.F., Kurbanova Z.K., Velizhanov N.M. Technology of direct seed production of F₁ hybrids of white cabbage based on CMS lines in Southern Dagestan (Tekhnologiya besperesadochnogo semenovodstva gibridov F₁ belokochannoy kapusty na osnove TSMS-liniy v Yuzhnom Dagestane). *Potato and Vegetables*. 2009b;(1):25-26. [in Russian] (Монахос Г.Ф., Курбанова З.К., Велижанов H.M. Технология беспересадочного семеноводства гибридов F, белокочанной капусты на основе ЦМС-линий в Южном Дагестане. Картофель и овощи. 2009b;(1):25-26).
- Monakhos G.F., Monakhos S.G., Alizhanova R.R. Breeding onions with resistance to downy mildew. Potato and Vegetables. 2019;(10):38-40. [in Russian] (Монахос Г.Ф., Монахос С.Г., Алижанова Р.Р. Селекция лука репчатого с устойчивостью к пероноспорозу. Картофель и овощи. 2019;(10):38-40). DOI: 10.25630/ PAV.2019.82.92.006
- Monakhos G.F., Vo Thi Ngok Ha, Dzhalilov F.S. Plant reaction to various inoculum concentrations of Xanthomonas campestris pv. campestris in black rot resistant brassicas. Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy. 2015;(1):26-34. [in Russian] (Монахос Г.Ф., Во Тхи Нгок Ха, Джалилов Ф.С. Проявление симптомов сосудистого бактериоза у капустных растений с различными генами устойчивости в зависимости от концентрации инокулюма Xanthomonas campestris pv. campestris. Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2015;(1):26-34).
- Nguyen M.L., Monakhos G.F., Komakhin R.A., Monakhos S.G. The new clubroot resistance locus is located on chromosome A05 in Chinese cabbage (Brassica rapa L.). Russian Journal of Genetics. 2018;54(3):296-304. DOI: 10.1134/S1022795418030080
- Orynbayev A.T., Dzhalilov F.S., Monakhos G.F. Evaluation methods and inheritance pattern of stem resistance to black rot in white cabbage. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2019;(1):45-55. [in Russian] (Орынбаев А.Т., Джалило Ф.С.У., Монахос Г.Ф. методы оценки и характер наследования стеблевой устойчивости к сосудистому бактериозу капусты. Тимирязевской белокочанной Известия сельскохозяйственной академии. 2019;(1):45-55). URL: https:// cyberleninka.ru/article/n/metody-otsenki-i-harakternasledovaniya-steblevoy-ustoychivosti-k-sosudistomu-bakteriozu-
- u-belokochannoy-kapusty/viewer [дата обращения: 13.01.2024].
- Zastavnyuk A.D., Monakhos G.F., Vishnyakova A.V., Mironov A.A., Monakhos S.G. Chinese cabbage clubroot resistance

genotyping and evaluation of combining ability. *Izvestiya* of *Timiryazev Agricultural Academy*. 2022;(5):77-91. [in Russian] (Заставнюк А.Д., Монахос Г.Ф., Вишнякова А.В., Миронов А.А., Монахос С.Г. Генотипирование устойчивости к киле и оценка комбинационной способности капусты пекинской. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2022;(5):77-91). DOI: 10.26897/0021-342X-2022-5-77-91

Zubko O., Monakhos S., Monakhos G. *Rb* gene introgression from *Brassica carinata* to *Brassica oleracea*. *Acta Horticulturae*. 2018;1202:107-112. DOI: 10.17660/ActaHortic.2018.1202.16

Zubko O.N., Monakhos G.F., Monakhos S.G. Method for selection of dihaploid plants of white cabbage *Brassica oleracea* resistant to vascular bacteriosis. Russian Federation; breeding achievement patent number: RU 2709991 Cl; 2019a. [in Russian] (Зубко О.Н., Монахос Г.Ф., Монахос С.Г. Способ отбора дигаплоидных растений капусты белокочанной *Brassica oleracea* устойчивых к сосудистому бактериозу. Российская Федерация; патент на селекционное достижение № RU 2709991 Cl; 2019a). URL: https://patenton.ru/patent/

RU2709991С1 [дата обращения: 13.01.2024].

Zubko O.N., Monakhos S.G., Monakhos G.F. Interspecific hybridization as an inducing factor of ogura-type CMS in Brassica plants. Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy. 2019b;(2):136-141. [in Russian] (Зубко О.Н., Монахос С.Г., Монахос Г.Ф. Возникновение ogura-подобной ЦМС в растениях Brassica при отдаленной гибридизации. Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2019b;(2):136-141). DOI: 10.34677/0021-342X-2019-2-136-141

Zubko O.N., Monakhos S.G., Monakhos G.F. Method for creating lines of white cabbage (*Brassica oleracea*) resistant to diseases. Russian Federation; breeding achievement patent number: RU 2777108 C1; 2022. [in Russian] (Зубко О.Н., Монахос С.Г., Монахос Г.Ф. Способ создания линий капусты белокочанной (*Brassica oleracea*), устойчивых к заболеваниям. Российская Федерация; патент на селекционное достижение № RU 777108 C1; 2022). URL: https://patenton.ru/patent/RU2777108C1 [дата обращения: 13.01.2024].

Информация об авторах

Киштили Уллубиевич Куркиев, доктор сельскохозяйственных наук, директор филиала, Дагестанская опытная станция — филиал ВИР, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР), 368612 Россия, республика Дагестан, Дербентский р-н, село Вавилово, kkish@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8232-6183

Сократ Григорьевич Монахос, доктор сельскохозяйственных наук, профессор РАН, профессор, заведующий, кафедра ботаники, селекции и семеноводства садовых растений, Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева (РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева), 127434 Россия, Москва, ул. Тимирязевская, 49, s.monakhos@rgau-msha.ru, https://orcid.org/0000-0001-9404-8862

Елена Константиновна Хлесткина, доктор биологических наук, профессор РАН, директор, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44; Вавиловское общество генетиков и селекционеров (ВОГиС), 196608 Россия, Санкт-Петербург, Пушкин 8, ш. Подбельского, 3, director@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-8470-8254

Information about the authors

Kishtili U. Kurkiev, Dr. Sci. (Agriculture), Director, Dagestan Experiment Station – branch of the VIR, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), Vavilovo village, Derbent District, Dagestan, 368612 Russia, kkish@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8232-6183

Sokrat G. Monakhos, Dr. Sci. (Agriculture), Professor of the Russian Academy of Sciences (RAS), Head, Department of Botany, Plant Breeding and Seed Technology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49, Timiryazevskaya Street, Moscow, 127434 Russia, s.monakhos@rgau-msha.ru, https://orcid.org/0000-0001-9404-8862

Elena K. Khlestkina, Dr. Sci. (Biology), Professor of the Russian Academy of Sciences (RAS), Director, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 42, 44, Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190000 Russia; Vavilov Society of Geneticists and Breeders (VOGiS), 3, Podbelsky Highway, Pushkin, St. Petersburg, 196608 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 20.03.2024; одобрена после рецензирования 25.03.2024; принята к публикации 27.03.2024.

The article was submitted on 20.03.2024; approved after reviewing on 25.03.2024; accepted for publication on 27.03.2024.

Краткое сообщение

УДК 57:579.26:579.64:60:378(470+571)(092)

DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1-06



К юбилею президента Вавиловского общества генетиков и селекционеров академика Игоря Анатольевича Тихоновича

А. А. Нижников^{1,2,3}, Е. К. Хлесткина^{1,4}

Автор, ответственный за переписку: Антон Александрович Нижников, a.nizhnikov@spbu.ru

І января 2024 года исполнилось 75 лет академику РАН Игорю Анатольевичу Тихоновичу, выдающемуся отечественному специалисту в области генетики растительно-микробных взаимодействий, видному педагогу высшей школы и организатору науки. Им опубликовано более 250 работ в рецензируемых изданиях, подготовлены 10 монографий и учебников, получено 12 патентов. Академик Тихонович более сорока лет руководил Всероссийским институтом сельскохозяйственной микробиологии, который под его руководством сформировал ведущую научную школу в области симбиогенетики, признанную на мировом уровне. Одним из важнейших концептуальных обобщений, предложенных И.А. Тихоновичем, стал сформулированный им принцип дополнительности геномов. Под руководством и при непосредственном участии Игоря Анатольевича в Санкт-Петербургском государственном университете и Научно-технологическом университете «Сириус» произошло становление и развитие новых образовательных программ магистратуры по агробиотехнологии и молекулярной биологии растений. Возглавляемое Игорем Анатольевичем Вавиловское общество генетиков и селекционеров (ВОГиС) за время его руководства пополнилось новыми отделениями и провело ряд важных научных мероприятий, включая VII Съезд ВОГиС и Форумы «Генетические ресурсы России». Друзья и соратники, представители отечественного генетико-селекционного сообщества, горячо поздравляют Игоря Анатольевича с юбилеем и желают крупных научных открытий, новых педагогических свершений и достижения всех поставленных целей.

Ключевые слова: симбиогенетика, горох, клубеньковые бактерии, бобовые, продовольственная безопасность, растительно-микробные взаимодействия, генетика, молекулярная биология

Для цитирования: Нижников А.А., Хлесткина Е.К. К юбилею президента Вавиловского общества генетиков и селекционеров академика Игоря Анатольевича Тихоновича. *Биотехнология и селекция растений*. 2024;7(1):58-64. DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1-06

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.

© Нижников А.А., Хлесткина Е.К., 2024

¹Вавиловское общество генетиков и селекционеров, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии, Санкт-Петербург, Россия

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

Brief communication

DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1-06

On the anniversary of the President of Vavilov Society of Geneticists and Breeders Academician Igor Anatolyevich Tikhonovich

Anton A. Nizhnikov^{1,2,3}, Elena K. Khlestkina^{1,4}

¹Vavilov Society of Geneticists and Breeders, St. Petersburg, Russia

²St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

³All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology, St. Petersburg, Russia

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

Corresponding author: Anton A. Nizhnikov, a.nizhnikov@spbu.ru

On January 1, 2024, Academician of the Russian Academy of Sciences Igor Anatolyevich Tikhonovich, an outstanding specialist in the field of genetics of plant-microbial interactions, a prominent higher education teacher and organizer of science, turned 75 years old. He has published more than 250 papers in peer-reviewed journals, prepared 10 monographs and textbooks, and received 12 patents. Academician Tikhonovich led the All-Russian Institute of Agricultural Microbiology for more than forty years, which under his leadership developed into a leading internationally recognized scientific school in the field of symbiogenetics. One of the most important conceptual generalizations formulated by I.A. Tikhonovich was the principle of complementarity of genomes. Under the leadership and with the direct participation of Igor Anatolyevich, the formation and development of new Master's degree programs in agrobiotechnology and molecular biology of plants was started at St. Petersburg State University and the Sirius University of Science and Technology. During the leadership of Igor Anatolyevich, the Vavilov Society of Geneticists and Breeders (VOGiS) was replenished with new departments and held a number of important scientific events, including the VII Congress of VOGiS and the "Russian Genetic Resources" Forums. Friends and associates, the community of geneticists and breeders of the Russian Federation warmly congratulate Igor Anatolyevich on his anniversary and wish him major scientific discoveries, new pedagogical achievements and the attainment of all his goals.

Keywords: symbiogenetics, peas, nodule bacteria, legumes, food security, plant-microbial interactions, genetics, molecular biology

For citation: Nizhnikov A.A., Khlestkina E.K. On the anniversary of the President of Vavilov Society of Geneticists and Breeders Academician Igor Anatolyevich Tikhonovich. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2024;7(1):58-64. (In Russ.). DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1-06

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, and their employers.

© Nizhnikov A.A., Khlestkina E.K., 2024

Выдающийся генетик академик РАН Игорь Анатольевич Тихонович (01.01.1949, Горловка, УССР) (Рис. 1) известен в нашей стране и за рубежом как специалист в области генетики растительно-микробных взаимодействий и, в более широком смысле, симбиогенетики. Творческий путь Игоря Анатольевича начался в Донецком государственном университете и был продолжен в стенах кафедры генетики и селекции Ленинградского государственного университета им. А.А. Жданова (ныне кафедры генетики и биотехнологии Санкт-Петербургского государственного университета), где он проходил аспирантуру (1971-1972, 1973-1975) с перерывом на службу в рядах Советской Армии. В 1975 году Игорь Анатольевич защитил кандидатскую, а в 1992 году – докторскую диссертации. С 1975 года работал младшим научным сотрудником Биологического института ЛГУ; с 1979 - старший научный сотрудник, затем с 1983 – заместитель директора, и с 1986 – директор и заведующий лабораторией биотехнологии Всесоюзного (Всероссийского) научно-исследовательского института сельскохозяйственной микробиологии (ФГБНУ ВНИИСХМ). Институтом Игорь Анатольевич руководил более 30 лет, а в настоящее время является его научным руководителем. За время руководства И.А. Тихоновича авторитет и известность Института сельскохозяйственной микробиологии значительно возросли на российском и мировом уровне, существенно улучшилась материальная база и, что особенно важно, был сохранен и получил дальнейшее развитие уникальный исследовательский коллектив.

Игорь Анатольевич создал ведущую отечественную школу по генетике растительно-микробных взаимодействий: под его руководством защитили диссертации десятки кандидатов и докторов наук, а исследования получили широкую известность и признание на мировом уровне. Масштаб этой научной школы подтверждается не только сотнями работ по данной тематике, опубликованных в международных периодических изданиях (см., например, Kosolapova et al., 2022; Safronova et al., 2020; Dolgikh et al., 2019; Kitaeva et al., 2016; Serova et al., 2017; Sulima et al., 2017; Kulaeva et al., 2017; Samorodova et al., 2018; Kirienko et al., 2018; Serova et al., 2019; Dolgikh et al., 2020; Leppyanen et al., 2021) и монографиях (см., например, Tikhonovich, Provorov, 2009; Provorov et al., 2016), но и целым рядом международных грантов и крупнейших конференций, проведенных под руководством И.А. Тихоновича, таких как Международный конгресс по биологической азотфиксации (Санкт-Петербург, 1995 год, около 700 участников из 50 стран мира) и Международный конгресс по молекулярным микробно-растительным взаимодействиям (Санкт-Петербург, 2003 год, около 800 участников из 70 стран). Игорем Анатольевичем внесен вклад мирового уровня в изучение молекулярных механизмов генетического контроля симбиотических взаимоотношений растений и микроорганизмов. Исследования проведены с использованием современных подходов геномики, транскриптомики, метаболомики и биоинформатической обработки данных, что позволило описать, конкретизировать целый ряд аспектов подобных взаимодействий и сформулировать принцип дополнительности геномов, характеризующий процессы, происходящие при образовании взаимовыгодных микробно-растительных надорганизменных систем. Многие из направлений научной работы И.А. Тихоновича имели значимое практическое применение, подтвержденное целым рядом патентов, прежде всего, в части создания микробиологических препаратов для современного земледелия, обеспечивающих оптимальное питание сельскохозяйственных растений, их защиту от вредителей и патогенов с минимальными экологическими рисками.

На протяжении всей своей работы И.А. Тихонович ведет активную педагогическую деятельность на кафедре генетики и биотехнологии СПбГУ, являясь с 2002 года профессором кафедры, участвуя в подготовке учебников и учебных пособий (Tikhonovich, Provorov, 2015). С 2015 года И.А. Тихонович возглавляет биологический факультет СПбГУ в качестве декана. Работа Игоря Анатольевича на трудном и ответственном посту декана ознаменовалась развитием образовательных программ магистратуры, направленных на подготовку кадров в области агробиотехнологии и молекулярной биологии растений. Усилилось взаимодействие с Научно-технологическим университетом «Сириус», где возникла сетевая образовательная программа в области генетики растений. Важным этапом в развитии факультета стало создание в составе консорциума из семи организаций научного центра мирового уровня «Агротехнологии будущего», соруководителем которого от СПбГУ стал И.А. Тихонович.

Игорь Анатольевич ведет большую общественную и экспертную работу. В 2014 году он был избран президентом межрегиональной общественной организации «Вавиловское общество генетиков и селекционеров» (ВОГиС), объединяющей около 3000 российских специалистов в области генетики и селекции. Под руководством Игоря Анатольевича в ряды ВОГиС вошли новые отделения. Общество провело ряд научных мероприятий, в том числе крупнейших, в области генетики и селекции. Так, в 2016 году в Москве состоялась Всероссийская с международным участием конференция «50 лет ВОГиС: успехи и перспективы», посвященная 50-летию ВОГиС (Рис. 2). В 2019 году с большим успехом прошел Международный конгресс «VII съезд Вавиловского общества генетиков и селекционеров, посвященный 100-летию кафедры генетики СПбГУ, и ассоциированные симпозиумы», собравший 1307 участников из более чем 30 стран (Рис. 3). На 2024 год запланировано проведение в Саратове Международного конгресса «VIII съезд Вавиловского общества генетиков и селекционеров», к участию в котором на момент написания данной статьи зарегистрировалось более 1000 специалистов. Наконец, в 2022 и 2023 годах состоялись I и II Научные форумы «Генетические ресурсы России», посвященные проблемам сохранения, пополнения и изучения различных биоресурсных коллекций, включившие в себя пленарную часть и ряд специализированных конференций (Рис. 4). Игорь Анатольевич является членом целого ряда экспертных комиссий, включая Совет по реализации Федеральной научно-технологической программы развития генетических технологий на 2019-2030 годы.

Масштабные научные и педагогические достижения И.А. Тихоновича отмечены целым рядом званий, наград и премий. С 1993 года он — член-корреспондент Российской академии сельскохозяйственных наук, в 1995 году ему присвоено звание профессора по специальности «микробиология», а в 1997 — звание академика Российской академии сельскохозяйственных наук. В 2014 году Игорь Анатольевич становится действительным членом

Российской академии наук, с 2023 года — членом Президиума Санкт-Петербургского отделения РАН. Работа Игоря Анатольевича удостоена Государственных наград, включая Орден Дружбы «За достигнутые трудовые успехи и многолетнюю добросовестную работу» в 2005 году и премию Правительства Российской Федерации в области науки и техники за 2013 год.

Друзья, соратники по президиуму ВОГиС, кафедре генетике и биотехнологии СПбГУ и ФГБНУ ВНИ-ИСХМ, отечественные генетики и селекционеры сердечно поздравляют дорогого Игоря Анатольевича с юбилеем и желают энергии, здоровья и вдохновения, новых крупных научных открытий и педагогических свершений, достижения всех поставленных целей!



Рис. 1. Академик И.А. Тихонович выступает на VI Съезде ВОГиС в Ростове-на-Дону, 2014 год. Фото из архивов ВОГиС.

Fig. 1. Academician Igor A. Tikhonovich speaks at the VI Congress of VOGiS in Rostov-on-Don, 2014.

Photo from VOGiS archives.



Рис. 2. Пленарное заседание Всероссийской с международным участием конференции «50 лет ВОГиС: успехи и перспективы», посвященной 50-летию ВОГиС, Москва, 2016 год.

Выступает генеральный директор РНФ А.В. Хлунов. В президиуме (слева направо) академики РАН С.В. Шестаков, И.А. Тихонович, С.Г. Инге-Вечтомов, Н.К. Янковский, Н.А. Колчанов. Фото из архивов ВОГиС.

Fig. 2. Plenary session of the All-Russian conference with international participation "50 years of VOGiS: successes and prospects", dedicated to the 50th anniversary of VOGiS, Moscow, 2016.

Speaker: General Director of the Russian Science Foundation A.V. Khlunov. In the presidium (from left to right) RAS academicians S.V. Shestakov, I.A. Tikhonovich, S.G. Inge-Vechtomov, N.K. Yankovsky, N.A. Kolchanov. Photo from VOGiS archives.



Рис. 3. Академик РАН И.А. Тихонович открывает международный конгресс «VII съезд Вавиловского общества генетиков и селекционеров, посвященный 100-летию кафедры генетики СПбГУ, и ассоциированные симпозиумы», Санкт-Петербург, 2019 год.

В президиуме (слева направо) академики РАН И.М. Донник, С.Г. Инге-Вечтомов, И.А. Тихонович, Н.А. Колчанов, Н.К. Янковский. Фото из архивов ВОГиС.

Fig. 3. Academician of the Russian Academy of Sciences I.A. Tikhonovich opens the International Congress "VII Congress of the Vavilov Society of Geneticists and Breeders, dedicated to the 100th anniversary of the Department of Genetics of St. Petersburg State University, and associated symposia", St. Petersburg, 2019.

In the presidium (from left to right) RAS academicians I.M. Donnik, S.G. Inge-Vechtomov, I.A. Tikhonovich, N.A. Kolchanov, N.K. Yankovsky. Photo from VOGiS archives.



Рис. 4. Академик РАН И.А. Тихонович открывает I научный форум «Генетические ресурсы России», Санкт-Петербург, 2022 г.

В президиуме (слева направо) профессор РАН А.А. Нижников, академики РАН И.М. Донник, И.А. Тихонович, вице-губернатор Санкт-Петербурга В.Н. Княгинин, профессор РАН Е.К. Хлесткина, председатель комитета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга А.С. Максимов. Фото из архивов ВОГиС.

Fig. 4. Academician of the RAS I.A. Tikhonovich opens the 1st scientific forum "Genetic Resources of Russia", St. Petersburg, 2022.

In the presidium (from left to right) is RAS Professor A.A. Nizhnikov, RAS academicians I.M. Donnik, I.A. Tikhonovich, Vice-Governor of St. Petersburg V.N. Knyaginin, RAS Professor E.K. Khlestkina, Chairman of the Committee on Science and Higher Education of the Government of St. Petersburg A.S. Maksimov, Photo from VOGiS archives.

References/Литература

Dolgikh A.V., Kirienko A.N., Tikhonovich I.A., Foo E., Dolgikh E.A. The DELLA proteins influence the expression of cytokinin biosynthesis and response genes during nodulation. *Frontiers in Plant Science*. 2019;10:432. DOI: 10.3389/fpls.2019.00432

Dolgikh E.A., Kusakin P.G., Kitaeva A.B., Tsyganova A.V., Kirienko A.N., Leppyanen I.V., Dolgikh A.V., Ilina E.L., Demchenko K.N., Tikhonovich I.A., Tsyganov V.E. Mutational analysis indicates that abnormalities in rhizobial infection and subsequent plant cell and bacteroid differentiation in pea (*Pisum sativum*) nodules coincide with abnormal cytokinin responses and localization. *Annals of Botany*. 2020;125(6):905-923. DOI: 10.1093/aob/mcaa022

Kirienko A.N., Porozov Y.B., Malkov N.V., Akhtemova G.A., Le Signor C., Thompson R., Saffray C., Dalmais M., Bendahmane A., Tikhonovich I.A., Dolgikh E.A. Role of a receptor-like kinase K1 in pea *Rhizobium* symbiosis development. *Planta*. 2018;248(5):1101-1120. DOI: 10.1007/s00425-018-2944-4

Kitaeva A.B., Demchenko K.N., Tikhonovich I.A., Timmers A.C.J., Tsyganov V.E., Comparative analysis of the tubulin cytoskeleton organization in nodules of *Medicago truncatula* and *Pisum* sativum: bacterial release and bacteroid positioning correlate with characteristic microtubule rearrangements. New Phytologist. 2016;210(1):168-183. DOI: 10.1111/nph.13792

Kosolapova A.O., Belousov M.V., Sulatsky M.I., Tsyganova A.V.,

Sulatskaya A.I., Bobylev A.G., Shtark O.Yu., Tsyganov V.E., Volkov K.V., Zhukov V.A., Tikhonovich I.A., Nizhnikov A.A. RopB protein of *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* adopts amyloid state during symbiotic interactions with pea (*Pisum sativum* L.). *Frontiers in Plant Science*. 2022;13:1014699. DOI: 10.3389/fpls.2022.1014699

Kulaeva O.A., Zhernakov A.I., Afonin A.M., Boikov S.S., Sulima A.S., Tikhonovich I.A., Zhukov V.A. Pea Marker Database (PMD) – a new online database combining known pea (*Pisum sativum L.*) gene-based markers. *PLoS ONE*. 2017;12(10):e0186713. DOI: 10.1371/journal.pone.0186713

Leppyanen I.V., Pavlova O.A., Vashurina M.A., Bovin A.D., Dolgikh A.V., Shtark O.Y., Sendersky I.V., Dolgikh V.V., Tikhonovich I.A., Dolgikh E.A. LysM Receptor-Like Kinase LYK9 of *Pisum sativum* L. may regulate plant responses to chitooligosaccharides differing in structure. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(2):711. DOI: 10.3390/ijms22020711

Provorov N.A., Tikhonovich I.A., Andronov E.E., Borisov A.Yu., Belimov A.A., Vorobyov N.I., Dolgikh E.A., Zhernakov A.I., Zhukov V.A., Kimeklis A.K., Kopat V.V., Kurchak O.N., Onischuk O.P., Safronova V.I., Sulima A.S., Chizhevskaya E.P., Chirak E.R., Stark O.Yu. Genetic basis of the evolution of bacteria – plant symbionts (Geneticheskiye osnovy evolyutsii bakteriy – simbiontov rasteniy). N.A. Provorov, I.A. Tikhonovich (eds). St. Petersburg; 2016. [in Russian] (Проворов Н.А.,

- И.А., Тихонович Андронов Е.Е., Борисов Белимов А.А., Воробьев Н.И., Долгих Е.А., Жернаков А.И., Жуков В.А., Кимеклис А.К., Копать В.В., Курчак О.Н., Онищук О.П., Сафронова В.И., Сулима А.С., Чижевская Е.П., Чирак Е.Р., Штарк О.Ю. Генетические основы эволюции бактерий – симбионтов растений / под ред. Н.А. Проворова, И.А. Тихоновича. Санкт-Петербург; 2016).
- nova V.I., Guro P.V., Sazanova A.L., Kuznetsova I.G., Belimov A.A., Yakubov V.V., Chirak E.R., Afonin A.M., Gogolev Y.V., Andronov E.E., Tikhonovich I.A. Rhizobial microsymbionts of Kamchatka Oxytropis species possess genes of the type III and VI secretion systems, which can affect the development of symbiosis. Molecular Plant-Microbe Interactions. 2020;33(10):1232-1241. DOI: 10.1094/MPMI-05-20-0114-R
- Samorodova V.E., Tvorogova Tkachenko Potsenkovskaya E.A., Lebedeva M.A., Tikhonovich I.A., Lutova L.A. Agrobacterial tumors interfere with nodulation and demonstrate the expression of nodulation-induced CLE genes in pea. Journal of Plant Physiology. 2018;221:94-100. DOI: 10.1016/j. jplph.2017.12.005
- Serova T.A., Tikhonovich I.A., Tsyganov V.E. Analysis of nodule senescence in pea (Pisum sativum L.) using laser microdissection, real-time PCR, and ACC immunolocalization. Journal of Plant Physiology. 2017;212:29-44. DOI: 10.1016/j.jplph.2017.01.012 Serova T.A., Tsyganova A.V., Tikhonovich I.A., Tsyganov V.E.

- Gibberellins inhibit nodule senescence and stimulate nodule meristem bifurcation in pea (Pisum sativum L.). Frontiers in Plant Science. 2019;10:285. DOI: 10.3389/fpls.2019.00285
- Sulima A.S., Zhukov V.A., Afonin A.A., Zhernakov A.I., Tikhonovich I.A., Lutova L.A. Selection signatures in the first exon of paralogous receptor kinase genes from the Sym2 region of the Pisum sativum L. genome. Frontiers in Plant Science. 2017;8:1957. DOI: 10.3389/fpls.2017.01957
- Tikhonovich I.A., Provorov N.A. Genetic basis of biotechnology in symbiotic nitrogen fixation. Chapter 9. (Geneticheskiye osnovy biotekhnologii v simbioticheskoy azotfiksatsii. Glava 9). In: Agricultural biotechnology and bioengineering: textbook (Sel'skokhozyaystvennaya biotekhnologiya i bioinzheneriya: uchebnik). V.S. Shevelukha (ed.). 4th ed. significantly reworked with additions. Moscow; 2015. p.356-390. [in Russian] (Тихонович И.А., Проворов Н.А. Генетические основы биотехнологии в симбиотической азотфиксации. Глава 9. В кн.: Сельскохозяйственная биотехнология и биоинженерия: учебник / под ред. В.С. Шевелухи. Изд. 4-е, значительно переработанное и дополненное. Москва; 2015. С.356-390).
- Tikhonovich I.A., Provorov N.A. Symbiosis of Plants and Microorganisms: The Molecular Genetics of the Agrosystems of the Future. St. Petersburg; 2009. [in Russian] (Тихонович И.А., Проворов Н.А. Симбиозы растений и микроорганизмов: молекулярная генетика агросистем будущего. Петербург; 2009).

Информация об авторах

Антон Александрович Нижников, доктор биологических наук, профессор РАН, профессор, и.о. заведующего кафедрой генетики и биотехнологии, Санкт-Петербургский государственный университет, 199034 Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9; заведующий лабораторией №7 Протеомики надорганизменных систем, Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии, 196608 Россия, Санкт-Петербург, Пушкин 8, ш. Подбельского, 3, a.nizhnikov@spbu.ru, https://orcid.org/0000-0002-8338-3494 Елена Константиновна Хлесткина, доктор биологических наук, профессор РАН, директор, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44, director@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-8470-8254

Information about the authors

Anton A. Nizhnikov, Dr. Sci. (Biology), Professor of the RAS, Acting Head, Genetics and Biotechnology Department, St. Petersburg State University, 7/9, Universitetskaya Embankment, St. Petersburg, 199034 Russia; Head, Laboratory for Proteomics of Supra-Organismal Systems, All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology, 3, Podbelsky Highway, Pushkin, St. Petersburg, 196608 Russia, a.nizhnikov@spbu.ru, https://orcid.org/0000-0002-8338-3494

Elena K. Khlestkina, Dr. Sci. (Biology), Professor of the RAS, Director, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 42, 44, Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190000 Russia, director@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-8470-8254

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 01.01.2024; одобрена после рецензирования 12.01.2024; принята к публикации 24.01.2024.

The article was submitted on 01.01.2024; approved after reviewing on 12.01.2024; accepted for publication on 24.01.2024.

Краткое сообщение УДК 575:60:631.52(470+571)(092) DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1-07



К юбилею почетного президента Вавиловского общества генетиков и селекционеров академика Владимира Константиновича Шумного

Е. К. Хлесткина^{1,2,3}, А. В. Кочетов^{2,3}, А. А. Нижников^{3,4,5}, И. А. Тихонович^{3,4,5}

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

Автор, ответственный за переписку: Елена Константиновна Хлесткина, director@vir.nw.ru

12 февраля 2024 года исполнилось 90 лет академику Российской академии наук Владимиру Константиновичу Шумному. В.К. Шумный с 1985 по 2007 годы возглавлял Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЦиГ СО РАН), на протяжении более 30 лет являлся заведующим кафедрой цитологии и генетики факультета естественных наук Новосибирского государственного университета и председателем диссертационного совета ИЦиГ СО РАН. С 1980 года Владимир Константинович входил в состав Президиума Сибирского отделения АН СССР (с 1991 года — Сибирское отделение Российской академии наук, СО РАН), в 1986 году стал заместителем председателя, а с 1992 года — председателем Объединенного ученого совета СО РАН по биологическим наукам. С 2004 года В.К. Шумный в течение 10 лет возглавлял Вавиловское обществе генетиков и селекционеров (ВОГиС), а с 2014 года является его почетным президентом. Более 20 лет В.К. Шумный являлся главным редактором периодического научного издания «Вестник ВОГиС» (ныне — Вавиловский журнал генетики и селекции). Научная деятельность В.К. Шумного связана с генетикой растений. Он — руководитель одной из крупнейших научных школ в этой сфере. Под его руководством защитили свои диссертации 6 докторов и 24 кандидата наук. Им опубликовано более 500 научных трудов, получено 12 авторских свидетельств на сорта растений. В.К. Шумный — соавтор и редактор нескольких школьных учебников по биологии.

Ключевые слова: Шумный В.К., генетика растений, генетическое образование, генная инженерия, геномное редактирование, гетерозис, горох, кукуруза, люцерна, мискантус, отдаленная гибридизация, полиплоидия, пшеница, рожь, селекция, хромосомная инженерия, ячмень

Для цитирования: Хлесткина Е.К., Кочетов А.В., Нижников А.А., Тихонович И.А. К юбилею почетного президента Вавиловского общества генетиков и селекционеров академика Владимира Константиновича Шумного. *Биотехнология и селекция растений.* 2024;7(1):65-71. DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1-07

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.

© Хлесткина Е.К., Кочетов А.В., Нижников А.А., Тихонович И.А., 2024

²Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики СО РАН, Новосибирск, Россия

³Вавиловское общество генетиков и селекционеров, Санкт-Петербург, Россия

⁴Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

⁵Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии, Санкт-Петербург, Россия

Brief communication

DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1-07

On the anniversary of the Honorary President of the Vavilov Society of Geneticists and Breeders Vladimir Konstantinovich Shumny

Elena K. Khlestkina^{1,2,3}, Alexey V. Kochetov^{2,3}, Anton A. Nizhnikov^{3,4,5}, Igor A. Tikhonovich^{3,4,5}

¹N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), St. Petersburg, Russia

²Institute of Cytology and Genetics, SB RAS, Novosibirsk, Russia

³Vavilov Society of Geneticists and Breeders, St. Petersburg, Russia

⁴St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

⁵All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: Elena K. Khlestkina, director@vir.nw.ru

On February 12, 2024, Academician of the Russian Academy of Sciences Vladimir Konstantinovich Shumny turned 90 years old. From 1985 to 2007, V.K. Shumny headed the Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ICG SB RAS). For more than 30 years he was the Head of the Department of Cytology and Genetics of the Faculty of Natural Sciences of Novosibirsk State University and the Chairman of the Dissertation Council of the Institute of Cytology and Genetics, SB RAS. Since 1980, Vladimir Konstantinovich was a member of the Presidium of the Siberian Branch of the Academy of Sciences of the USSR (since 1991 – Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, SB RAS). In 1986 he became the Deputy Chairman, and in 1992 Chairman of the Joint Scientific Council of the SB RAS for biological sciences. For 10 years starting from 2004, V.K. Shumny headed the Vavilov Society of Geneticists and Breeders (VOGiS), and since 2014 he has been the Honorary President of this society. For more than 20 years, V.K. Shumny was the Editor-in-Chief of the periodical scientific publication "VOGiS Herald" (now the "Vavilov Journal of Genetics and Breeding"). The scientific activity of V.K. Shumny is related to plant genetics. He is the Head of one of the largest scientific schools in this field. Under his leadership, 6 doctors and 24 candidates of science defended their dissertations. He has published more than 500 scientific papers and received 12 certificates of authorship for plant varieties. V.K. Shumny is the co-author and editor of several school textbooks on biology.

Keywords: Shumny V.K., plant genetics, education in genetics, genetic engineering, genome editing, heterosis, peas, maize, alfalfa, miscanthus, wide hybridization, polyploidy, wheat, rye, breeding, chromosome engineering, barley

For citation: Khlestkina E.K., Kochetov A.V., Nizhnikov A.A., Tikhonovich I.A. On the anniversary of the Honorary President of the Vavilov Society of Geneticists and Breeders Vladimir Konstantinovich Shumny. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2024;7(1):65-71. (In Russ.). DOI: 10.30901/2658-6266-2024-1-07

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, and their employers.

© Khlestkina E.K., Kochetov A.V., Nizhnikov A.A., Tikhonovich I.A., 2024

Выдающийся организатор генетической науки в Сибири академик Владимир Константинович Шумный, в разные годы – директор Института цитологии и генетики СО РАН, председатель Объединенного ученого совета СО РАН по биологическим наукам, президент Вавиловского общества генетиков и селекционеров - известен в первую очередь как специалист в области генетики культурных растений, работы которого направлены на внедрение передовых методов генетики в селекционную практику. Под его руководством в Институте цитологии и генетики СО РАН активное развитие получили направления работ по генетике, хромосомной (Numerova et al., 2004; Pershina et al., 1981; 1985; 2018; Pershina, Shumny, 1981; Silkova et al., 2006), генной и геномной инженерии растений (Gerasimova et al., 2010; 2017; 2018; Ibragimova et al., 2015; Kochetov et al., 2004; Kochetov, Shumny, 2017; Korotkova et al., 2017; Rivkin et al., 1993; Sangaev et al., 2007; Smirnova et al., 2019; Trifonova et al., 2004; 2015; Turchinovich et al., 2004; Zagorskaya et al., 2009; Zhirnov et al., 2016). Особое внимание в его работах уделено отдаленной гибридизации растений и полиплоидии (Adonina et al., 2011; Leonova et al., 2013; Orlovskaya et al., 2015; Shumny et al., 2016; Shumny, Pershina, 1979; 1980; Silkova et al., 2011; 2012; 2013; Svitashev et al., 1995), а также гетерозису растений и связанным с этим вопросам (инбридинг, генетико-селекционные аспекты опыления растений и так далее) (Kovalenko, Shumny, 2008; Pokhmel'nykh, Shumny, 1999; Shumny et al., 1978). В.К. Шумным получено 12 авторских свидетельств и патентов на сорта растений и технологии. Отдельное внимание посвящено получению сортов зерновых культур на основе отдаленной гибридизации (Abakumov et al., 2017; Arbuzova et al., 2009; Belan et al., 2012; Laikova et al., 2013), созданию генетических линий и доноров для получения сортов гороха с повышенной азотфиксацией (Nazaryuk et al., 2005; Sidorova et al., 2001; Sidorova, Shumny 1998; 2003), сравнительным генетическим исследованиям сортов, созданных в разные периоды селекции (Khlestkina et al., 2004а,b), а также всестороннему изучению новой технической культуры – мискантусу (Gismatulina et al., 2014; 2015; Goryachkovskaya et al., 2016; Kapustyanchik et al., 2020; Shumny et al., 2010; Slynko et al., 2013; 2019).

В.К. Шумный уделял большое внимание подготовке кадров высшей квалификации. Ученики академика Шумного — ведущие специалисты в области классической и молекулярной генетики, клеточной биологии и биотехнологии. Под его руководством защитили диссертации шесть докторов наук и 24 кандидата наук. Более

30 лет академик Шумный заведовал кафедрой цитологии и генетики факультета естественных наук Новосибирского государственного университета и возглавлял диссертационный совет ИЦиГ СО РАН. В.К. Шумный — соавтор и редактор нескольких школьных учебников по биологии, он известен как талантливый популяризатор науки.

Владимир Константинович уделяет огромное внимание развитию междисциплинарных исследований. И это выразилось не только в активном проведении им и его учениками исследований на стыке биологической и сельскохозяйственной науки — он также содействовал сотрудничеству генетиков и археологов и развитию в ИЦиГ СО РАН совместно с ИАЭТ СО РАН такого направления как палеогенетика (Voevoda et al., 1998).

В.К. Шумный ведет важную работу в составе редакционных советов ряда российских журналов в области генетики и селекции, включая «Вавиловский журнал генетики и селекции», «Генетика», «Экологическая генетика» и «Биотехнология и селекция растений». Более 20 лет В.К. Шумный являлся главным редактором Вавиловского журнала генетики и селекции (первоначальное название — «Вестник ВОГиС»), при нем это периодическое издание, учрежденное в 1990-е годы совместно ВОГиС, СО РАН и ИЦиГ СО РАН, превратилось в ведущий отечественный журнал в области генетики и селекции со статусом Platinum Open Access, издаваемый на двух языках и включенный в ведущие отечественные и зарубежные базы цитирования.

Академик В.К. Шумный — лауреат премии имени академика В.А. Коптюга НАН Беларуси и Сибирского отделения РАН, заслуженный деятель науки Новосибирской области, его достижения отмечены орденами и медалями, в том числе орденом Трудового Красного Знамени, орденом «Знак Почета», орденом «За заслуги перед Отечеством» IV и III степени, медалями. За серию работ «Изучение явлений гетерозиса, полиплоидии, хромосомной и генной инженерии у растений, а также создание ценных селекционных форм» академик В.К. Шумный удостоен Золотой медали им. Н.И. Вавилова РАН.

Президиум ВОГиС и Новосибирское отделение ВОГиС от лица генетиков и селекционеров всей страны сердечно поздравляют академика Владимира Константиновича Шумного – мудрого руководителя и наставника, блестящего организатора генетической науки в Сибири, и желают неиссякаемого творческого вдохновения, плодотворного развития возглавляемой научной школы, крепкого сибирского здоровья и долгих лет жизни!



Рис. Академик Владимир Константинович Шумный

(Фото из открытого доступа, URL: https://academcity.org/content/akademik-shumnyy-v-usloviyah-reformy-nauki-vozrastaet-rol-takih-organizaciy-kak-vogis)

Fig. Academician Vladimir Konstantinovich Shumny

(Open access photo from URL: https://academcity.org/content/akademik-shumnyy-v-usloviyah-reformy-nauki-vozrastaet-rol-takih-organizaciy-kak-vogis)

References/Литература

Abakumov S.N., Belan I.A., Blokhina N.P., Bondar N.P., Ignatieva E.Yu., Makienko O.I., Meshkova L.V., Pershina L.A., Popolzukhin P.V., Rosseeva L.P., Trubacheeva N.V., Shumny V.K. Spring bread wheat Ishimckaya 11. Russian Federation; breeding achievement patent number: 10854; 2017. [in Russian] (Абакумов С.Н., Белан И.А., Блохина Н.П., Бондарь Н.П., Игнатьева Е.Ю., Макиенко О.И., Мешкова Л.В., Першина Л.А., Поползухин П.В., Россеева Л.П., Трубачеева Н.В., Шумный В.К. Пшеница мягкая яровая Ишимская 11. Российская Федерация; патент на селекционное достижение № 10854; 2017).

Adonina I.G., Orlovskaya O.A., Tereshchenko O.Y., Koren L.V., Khotyleva L.V., Shumny V.K., Salina E.A. Development of commercially valuable traits in hexaploid triticale lines with *Aegilops* introgressions as dependent on the genome composition. *Russian Journal of Genetics*. 2011;47(4):453-461. DOI: 10.1134/

S1022795411040028

Arbuzova V.S., Belan I.A., Blokhina N.P., Efremova T.T., Zykin V.A., Kolmakov Yu.V., Laikova L.A., Lozhnikova L.F., Meshkova L.V., Pershina L.A., Popova O.M., Popolzukhin P.V., Rosseev V.M., Rosseeva L.P., Shumny V.K. Spring bread wheat Pamyati Maystrenko. Russian Federation; breeding achievement patent number: 6859; 2009. [in Russian] (Арбузова В.С., Белан И.А., Блохина Н.П., Ефремова Т.Т., Зыкин В.А., Колмаков Ю.В., Лайкова Л.И., Ложникова Л.Ф., Мешкова Л.В., Першина Л.А., Попова О.М., Поползухин П.В., Россеев В.М., Россеева Л.П., Шумный В.К. Пшеница мягкая яровая памяти Майстренко. Российская Федерация; патент на селекционное достижение № 6859; 2009).

Belan I.A., Blokhina N.P., Valueva L.G., Devyatkina E.P., Zykin V.A., Ignatieva E.Yu, Lozhnikova L.F., Meshkova L.V., Morgunov A.I., Pakhotina I.V., Pershina L.A., Popolzukhin P.V., Rosseev V.M., Rosseeva L.P., Shepelev S.S., Shumny V.K. Spring bread wheat Sigma. Russian Federation; breeding achievement patent number: 7950; 2012. [in Russian] (Белан И.А., Блохина Н.П.,

- Валуева Л.Г., Девяткина Э.П., Зыкин В.А., Игнатьева Е.Ю., Ложникова Л.Ф., Мешкова Л.В., Моргунов А.И., Пахотина И.В., Першина Л.А., Поползухин П.В., Россеев В.М., Россеева Л.П., Шепелев С.С., Шумный В.К. Пшеница мягкая яровая Сигма. Российская Федерация; патент на селекционное достижение № 7950; 2012).
- Gerasimova S.V., Khlestkina E.K., Kochetov A.V., Shumny V.K. Genome editing system CRISPR/CAS9 and peculiarities of its application in monocots. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2017;64(2):141-155. DOI: 10.1134/S1021443717010071
- Gerasimova S.V., Kolodyazhnaya Ya.S., Titov S.E., Romanova A.V., Koval' V.S., Kochetov A.V., Shumnyi V.K. Tobacco transformants expressing the *Medicago truncatula* ornithine aminotransferase cDNA. *Russian Journal of Genetics*. 2010;46(7):890-893. DOI: 10.1134/S102279541007015X
- Gerasimova S.V., Korotkova A.M., Hertig C., Hiekel S., Hoffie R., Budhagatapalli N., Otto I., Hensel G., Shumny V.K., Kochetov A.V., Kumlehn J., Khlestkina E.K. Targeted genome modification in protoplasts of a highly regenerable Siberian barley cultivar using RNA-guided Cas9 endonuclease. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2018;22(8):1033-1039. DOI: 10.18699/VJ18.447
- Gismatulina Y.A., Budaeva V.V., Veprev S.G., Sakovich G.V., Shumny V.K. Cellulose from various parts of Soranovskii Miscanthus. Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2014;18(3):553-563. [in Russian] (Гисматулина Ю.А., Будаева В.В., Вепрев С.Г., Сакович Г.В., Шумный В.К. Особенности целлюлоз из различных морфологических частей мискантуса сорта Сорановский. Вавиловский журнал генетики и селекции. 2014;18(3):553-563).

 Gismatulina Y.A., Budaeva V.V., Veprev S.G., Sakovich G.V.,
- Gismatulina Y.A., Budaeva V.V., Veprev S.G., Sakovich G.V., Shumny V.K. Cellulose from various parts of Soranovskii *Miscanthus. Russian Journal of Genetics: Applied Research.* 2015;5(1):60-68. DOI: 10.1134/S2079059715010049
- Goryachkovskaya T., Slynko N., Golubeva E., Shekhovtsov S.V., Nechiporenko N., Veprev S., Meshcheryakova I., Starostin K., Burmakina N., Bryanskaya A., Kolchanov N., Shumny V., Peltek S.E. "Soranovskii": a new Miscanthus cultivar developed in Russia. In: *Perennial Biomass Crops for a Resource-Constrained World*. Springer Cham; 2016. p.67-76. DOI: 10.1007/978-3-319-44530-4 6
- Ibragimova S.M., Trifonova E.A., Filipenko E.A., Shymny V.K. Evaluation of salt tolerance of transgenic tobacco plants bearing the *P5CS1* gene of *Arabidopsis thaliana. Russian Journal of Genetics*. 2015;51(12):1181-1188. DOI: 10.1134/S1022795415120078
- Kapustyanchik S.Yu., Potseluev O.M., Galitsyn G.Yu., Lihenko I.E., Budaeva V.V., Gismatulina Yu.A., Shumny V.K. Ecological and biological assessment of the promising technical crop *Miscanthus sacchariflorus*. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*. 2020;34(1):42-46. [in Russian] (Капустянчик С.Ю., Поцелуев О.М., Галицын Г.Ю., Лихенко И.Е., Будаева В.В., Гисматулина Ю.А., Шумный В.К. Эколого-биологическая оценка перспективной технической культуры *Miscanthus sacchariflorus*. *Достижения науки и техники АПК*. 2020;34(1):42-46). DOI: 10.24411/0235-2451-2020-10108
- Khlestkina E.K., Efremova T.T., Shumny V.K., Röder M.S., Börner A. The genetic diversity of old and modern Siberian varieties of common spring wheat as determined by microsatellite markers. *Plant Breeding*. 2004a;123(2):122-127. DOI: 10.1046/j.1439-0523.2003.00934.x
- Khlestkina E.K., Salina E.A., Shumny V.K. Genotyping of the native varieties of soft wheat by the microsatellite (SSR) markers. Agricultural Biology. 2004b;39(5):44-52. [in Russian] (Хлесткина Е.К., Салина Е.А., Шумный В.К. Генотипирование отечественных сортов мягкой пшеницы с использованием микросателлитных (SSR) маркеров. Сельскохозяйственная биология. 2004b;39(5):44-52).
- Kochetov A.V., Shumny V.K. Transgenic plants as genetic models for studying functions of plant genes. Russian Journal of Genetics: Applied Research. 2017;7(4):421-427. DOI: 10.1134/ S2079059717040050
- Kochetov A.V., Titov S.E., Kolodyazhnaya Ya.S., Komarova M.L.,

- Koval V.S., Makarova N.N., Il'yinskyi Yu.Yu., Trifonova E.A., Shumny V.K. Tobacco transformants bearing antisense suppressor of proline dehydrogenase gene, are characterized by higher proline content and cytoplasm osmotic pressure. *Russian Journal of Genetics*. 2004;40(2):216-218. DOI: 10.1023/B:RUGE.0000016999.53466.e1
- Korotkova A.M., Gerasimova S.V., Shumny V.K., Khlestkina E.K. Crop genes modified using the CRISPR/Cas system. *Russian Journal* of Genetics: Applied Research. 2017;7(8):822-832. DOI: 10.1134/ S2079059717050124
- Kovalenko V.I., Shumny V.K. Tripping and seed productivity in perennial species of alfalfa *Medicago* L. under open pollination and flowering. *VOGiS Herald*. 2008;12(4):740-748. [in Russian] (Коваленко В.И., Шумный В.К. Триппинг и семенная продуктивность у многолетних видов люцерны *Medicago* L. при свободном цветении и опылении. *Информационный вестник ВОГиС*. 2008;12(4):740-748). URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_12515869_55466592.pdf [дата обращения: 14.01.20241].
- Laikova L.I., Shumny V.K., Pershina L.A., Belan I.A., Rosseeva L.P., Shepelev S.S., Badaeva E.D. Development and study of spring bread wheat variety Pamyati Maystrenko with introgression of genetic material from synthetic hexaploid *Triticum* timopheevii Zhuk. × Aegilops tauschii Coss. Russian Journal of Genetics. 2013;49(1):89-97. DOI: 10.1134/S1022795413010067
- Leonova I.N., Badaeva E.D., Orlovskaya O.A., Röder M.S., Khotyleva L.V., Salina E.A., Shumny V.K. Comparative characteristic of *Triticum aestivum/Triticum durum* and *Triticum aestivum/Triticum dicoccum* hybrid lines by genomic composition and resistance to fungal diseases under different environmental conditions. *Russian Journal of Genetics*. 2013;49(11):1112-1118. DOI: 10.1134/S1022795413110136
- Nazaryuk V.M., Sidorova K.K., Shumnyi V.K., Klenova M.I., Kalimullina F.R. The role of the macrosymbiont genotype in the optimization of nitrogen regimen of soils. *Doklady Biological Sciences*. 2005;404:352-354. DOI: 10.1007/s10630-005-0133-7
- Numerova O.M., Pershina L.A., Salina E.A., Shumny V.K. Barley chromosome identification using genomic in situ hybridization in the genome of backcrossed progeny of barley-wheat amphiploids [Hordeum geniculatum all. (2n=28) × Triticum aestivum L. (2n=42)] (2n=70). Russian Journal of Genetics. 2004;40(9):1007-1010. DOI: 10.1023/B:RUGE.0000041380.12101.ab
- Orlovskaya O.A., Leonova I.N., Adonina I.G., Salina E.A., Khotyleva L.V., Shumny V.K. Molecular-cytogenetic analysis of triticale and wheat lines with introgressions of the tribe Triticeae species genetic material. Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2015;19(5):552-560. [in Russian] (Орловская О.А., Леонова И.Н., Адонина И.Г., Салина Е.А., Хотылева Л.В., Шумный В.К. Молекулярно-цитогенетический анализ линий тритикале и пшеницы с интрогрессиями генетического материала видов трибы Triticeae. Вавиловский журнал генетики и селекции. 2015;19(5):552-560). DOI: 10.18699/V115.072
- Pershina L.A., Belova L.I., Trubacheeva N.V., Osadchaya T.S., Shumny V.K., Belan I.A., Rosseeva L.P., Nemchenko V.V., Abakumov S.N. Alloplasmic recombinant lines (H. vulgare)-T. aestivum with 1RS.1BL translocation: initial genotypes for production of common wheat varieties. Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2018;22(5):544-552. DOI: 10.18699/VJ18.393
- Pershina L.A., Shumny V.K. A characterization of clonal propagation of barley × rye and barley × wheat hybrids by means of tissue cultures. *Cereal Research Communications*. 1981;9(4):273-279.
- Pershina L.A., Shumny V.K., Belova L.I. Production of barley × rye and barley × wheat hybrids. *Cereal Research Communications*. 1981;9(4):265-272.
- Pershina L.A., Shumny V.K., Belova L.I., Numerova O.M. *Hordeum geniculatum* All. × *Secale cereale* L. hybrids and their backcross generations with rye. *Cereal Research Communications*. 1985;13(2/3):141-147. URL: https://www.jstor.org/stable/23782993 [accessed January 13, 2024].
- Pokhmel'nykh G.A., Shumny V.K. Heterochromatic regions and the protandry mechanism in populations of self-pollinated corn lines. *Russian Journal of Genetics*. 1999;35(9):1055-1062.

- Rivkin M.I., Deineko E.V., Komarova M.L., Kochetov A.V., Shumny V.K. Assessment of virus resistance of transgenic tobacco and alfalfa plants bearing the human beta-interferon gene. Doklady Akademii Nauk. 1993;331(5):652-654. [in Russian] (Ривкин М.И., Дейнеко Е.В., Комарова М.Л., Кочетов А.В., Шумный В.К. Оценка вирусоустойчивости трансгенных растений табака и люцерны, несущих ген бета-интерферона человека. Доклады Академии наук. 1993;331(5):652-654).
- Sangaev S.S., Trifonova E.A., Titov S.E., Romanova A.V., Kolodyazhnaya Ya.S., Komarova M.L., Kochetov A.V., Shumny V.K., Sapotsky M.V., Malinovsky V.I. Effective expression of the gene encoding an extracellular ribonuclease of *Zinnia elegans* in the SR1 *Nicotiana tabacum* plants. *Russian Journal of Genetics*. 2007;43(7):831-833. DOI: 10.1134/S1022795407070186
- Shumnij V.K., Pershina L.A. Some results of remote hybridization of several barley species. *Agricultural Biology*. 1980;15(2):290-296. [in Russian] (Шумный В.К., Першина Л.А. К итогам отдаленной гибридизации некоторых злаковых с использованием разных видов ячменя *Сельскохозяйственная биология*. 1980;15(2):290-296).
- Shumny V., Khlestkina E., Leonova I., Salina E. Broadening the genetic diversity of bread wheat using alien germplasm: emphasis on disease resistance. In: Genetics, Evolution and Radiation: Crossing Borders, The Interdisciplinary Legacy of Nikolay W. Timofeeff-Ressovsky. Cham; 2016. p.107-120. DOI: 10.1007/978-3-319-48838-7
- Shumny V.K., Kolchanov N.A., Sakovich G.V., Parmon V.N., Veprev S.G., Nechiporenko N.N., Goryachkovskaya T.N., Bryanskaya A.V., Budaeva V.V., Zheleznov A.V., Zheleznova N.B., Zolotukhin V.N., Mitrofanov R.Yu., Rozanov A.S., Sorokina K.N., Slynko N.M., Yakovlev V.A., Peltek S.E. Search for renewable sources of multi-purpose cellulose. VOGiS Herald. 2010;14(3):569-578. [in Russian] (Шумный В.К., Колчанов Н.А., Сакович Г.В., Пармон В.Н., Вепрев С.Г., Нечипоренко Н.Н., Горячковская Т.Н., Брянская А.В., Будаева В.В., Железнов А.В., Железнова Н.Б., Золотухин В.Н., Митрофанов Р.Ю., Розанов А.С., Сорокина К.Н., Слынько Н.М., Яковлев В.А., Пельтек С.Е. Поиск возобновляемых источников целлюлозы для многоцелевого использования. Информационный вестник ВОГиС. 2010;14(3):569-578). URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_16569239_27028481.pdf [дата обращения: 14.01.2024].
- Shumny V.K., Kovalenko V.I., Kvasova E.V., Kolosova L.D. Some genetic and breeding aspects of reproduction systems in plants. *Genetika*. 1978;14(1):25-35. [in Russian] (Шумный В.К., Коваленко В.И., Квасова Э.В., Колосова Л.Д. Некоторые генетические и селекционные аспекты систем размножения у растений. *Генетика*. 1978;14(1):25-35).
- Shumny V.K., Pershina L.A. Obtaining barley-rye hybrids and their cloning by the method of culture of isolated tissues. *Doklady Biological Sciences*. 1979;249(1-6):1243-1245.
- Sidorova K.K., Nazaryuk V.M., Shumny V.K., Klenova M.I. A new model for the assessment of the efficiency of legume-rhizobial symbiosis. *Doklady Biological Sciences*. 2001;380:464-466. DOI: 10.1023/a:1012327522542
- Sidorova K.K., Shumnyi V.K. A Collection of symbiotic mutants in pea Pisum sativum L.: creation and genetic study. Russian Journal of Genetics. 2003;39(4):406-413.
- Sidorova K.K., Shumnyi V.K. Analysis of pea (*Pisum sativum L.*) supernodulating mutants. *Russian Journal of Genetics*. 1998;34(10):1233-1235.
- Silkova O.G., Adonina I.G., Krasilova N.M., Shchapova A.I., Shumny V.K. Chromosome pairing in wheat-rye ABDR hybrids depends on the microsporogenesis pattern. *Russian Journal of Genetics*. 2012;48(6):592-598. DOI: 10.1134/S1022795412060130
- Silkova O.G., Adonina I.G., Shchapova A.I., Shumny V.K., Krivosheina E.A. Chromosome pairing in meiosis of partially fertile wheat/rye hybrids. *Plant Reproduction*. 2013;26(1):33-41. DOI: 10.1007/s00497-012-0207-2
- Silkova O.G., Dobrovolskaya O.B., Dubovets N.I., Adonina I.G., Kravtsova L.A., Roeder M.S., Salina E.A., Shchapova A.I.,

- Shumny V.K. Production of wheat-rye substitution lines and identification of chromosome composition of karyotypes using C-banding, GISH, and SSR markers. *Russian Journal of Genetics*. 2006;42(6):645-653. DOI: 10.1134/S1022795406060093
- Silkova O.G., Shchapova A.I., Shumny V.K. Meiotic restitution in amphihaploids in the tribe Triticeae. *Russian Journal of Genetics*. 2011;47(4):383-393. DOI: 10.1134/S1022795411040120
- Slynko N.M., Burmakina N.V., Potseluyev O.M., Kapustyanchik S. Yu., Galitsin G.Yu., Goryachkovskaya T.N., Kuybida L.V., Shekhovtsov S.V., Peltek S.E., Shumny V.K. Gas chromatography-mass spectrometry in the taxonomy of miscanthus. Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2019;23(8):1076-1081. [in Russian] (Слынько Н.М., Бурмакина Н.В., Поцелуев О.М., Капустянчик С.Ю., Галицын Г.Ю., Горячковская Т.Н., Куйбида Л.В., Шеховцов С.В., Пельтек С.Е., Шумный В.К. Метод газовой хроматографии-масс-спектрометрии для таксономии мискантуса. Вавиловский журнал генетики и селекции. 2019;23(8):1076-1081). DOI: 10.18699/VJ19.583
- Slynko N.M., Goryachkovskaya T.N., Shekhovtsov S.V., Bannikova S.V., Burmakina N.V., Starostin K.V., Rozanov A.S., Nechiporenko N.N., Veprev S.G., Shumny V.K., Kolchanov N.A., Peltek S.E. The biotechnological potential of the new crop, Miscanthus cv. Soranovskii. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2013;17(4/1):765-771. [in Russian] (Слынько Н.М., Горячковская Т.Н., Шеховцов С.В., Банникова С.В., Бурмакина Н.В., Старостин К.В., Розанов А.С., Нечипоренко Н.Н., Вепрев С.Г., Шумный В.К., Колчанов Н.А., Пельтек С.Е. Биотехнологический потенциал новой технической культуры мискантус сорт Сорановский. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2013;17(4/1):765-771). URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_21150806_31399667.pdf [дата обращения: 14.01.2024].
- Smirnova O.G., Shumny V.K., Kochetov A.V. Regulatory sequences for constitutive, tissue-specific, and induced expression of transgenes in ornamental plants. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2019;66(5):679-693. DOI: 10.1134/S1021443719050182
- Svitashev S.K., Vershinin A.V., Trunova S.A., Pershina L.A., Shumny V.K. Molecular analysis of the genomes of wide hybrids in cereals. *Hereditas*. 1995;122(1):25-31. DOI: 10.1111/j.1601-5223.1995.00025.x
- Trifonova E.A., Komarova M.L., Leonova N.S., Shcherban' A.B., Kochetov A.V., Shumnyi V.K., Malinovskii V.I. Transgenic potato (Solanum tuberosum L.) plants expressing the gene of secretory nuclease from Serratia marcescens.

 Doklady Biochemistry and Biophysics. 2004;394:39-41.

 DOI: 10.1023/B:DOBI.0000017151.98825.d5
- Trifonova E.A., Romanova A.V., Filipenko E.A., Kochetov A.V., Shumny V.K., Sapotsky M.V., Malinovsky V.I., Saveleva A.V. Transgenic expression of *Serratia marcescens* native and mutant nucleases modulates tobacco mosaic virus resistance in *Nicotiana tabacum* L. *Russian Journal of Genetics*. 2015;51(7):715-719. DOI: 10.1134/S1022795415070133
- Turchinovich A.A., Deineko E.V., Filipenko M.L., Khrapov E.A., Zagorskaya A.A., Filipenko E.A., Sennikov S.V., Kozlov V.A., Shumnyi V.K. Transgenic tobacco plants producing human interleukin-18. *Doklady Biochemistry and Biophysics*. 2004;395:104-107. DOI: 10.1023/B:DOBI.0000025557.32381.1f
- Voevoda M.I., Sitnikova V.V., Chikisheva T.A., Romaschenko A.G., Polosmak N.V., Molodin V.I., Derevianko A.P., Shumnyi V.K. Molecular and genetic analysis of mitochondrial DNA of representatives of the pazyryk culture of the Mountain Altai (4th–2nd cent. b.c.). Doklady Biological Sciences. 1998;358:71-73. [in Russian] (Воевода М.И., Ситникова В.В., Чикишева Т.А., Ромащенко А.Г., Полосьмак Н.В., Молодин В.И., Деревянко А.П., Шумный В.К. Молекулярногенетический анализ митохондриальной ДНК представителей пазырыкской культуры Горного Алтая (IV-II вв. до н.э.). Доклады Академии наук. 1998;358(4):564-566).
- Zagorskaya A.A., Sidorchuk Y.V., Shumnyi V.K., Deineko E.V. Dynamics of IAA and cytokinins in flower tissues of transgenic tobacco mutant plants with mutant phenotype. *Russian Journal*

of Plant Physiology. 2009;56(6):830-837. DOI: 10.1134/S1021443709060132

Zhirnov I.V., Trifonova E.A., Romanova A.V., Filipenko E.A., Sapotsky M.V., Malinovsky V.I., Kochetov A.V., Shumny V.K.

Induced expression of *Serratia marcescens* ribonuclease III gene in transgenic *Nicotiana tabacum* L. cv. SR1 tobacco plants. *Russian Journal of Genetics*. 2016;52(11):1137-1141. DOI: 10.1134/S102279541611017X

Информация об авторах

Елена Константиновна Хлесткина, доктор биологических наук, профессор РАН, директор, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44; Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения РАН (ИЦиГ СО РАН), 630090 Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 10; Вавиловское общество генетиков и селекционеров (ВОГиС), 196608 Россия, Санкт-Петербург, Пушкин 8, ш. Подбельского, 3, director@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-8470-8254

Алексей Владимирович Кочетов, доктор биологических наук, академик РАН, профессор РАН, директор, Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения РАН (ИЦиГ СО РАН), 630090 Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 10; Вавиловское общество генетиков и селекционеров (ВОГиС), 196608 Россия, Санкт-Петербург, Пушкин 8, ш. Подбельского, 3, ak@bionet.nsc.ru, https://orcid.org/0000-0003-3151-5181

Антон Александрович Нижников, доктор биологических наук, профессор РАН, профессор, и.о. заведующего кафедрой генетики и биотехнологии, Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ), 199034 Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9; Вавиловское общество генетиков и селекционеров (ВОГиС); заведующий лабораторией №7 Протеомики надорганизменных систем, Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии (ВНИИСХМ), 196608 Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, 8, ш. Подбельского, 3, a.nizhnikov@arriam.ru, https://orcid.org/0000-0002-8338-3494

Игорь Анатольевич Тихонович, доктор биологических наук, академик РАН, профессор, декан биологического факультета, Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ), 199034 Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9; президент ВОГиС, Вавиловское общество генетиков и селекционеров (ВОГиС); научный руководитель, Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии (ВНИИСХМ), 196608 Россия, Санкт-Петербург, Пушкин 8, ш. Подбельского, 3, igor.tikhonovich49@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8968-854X

Information about the authors

Elena K. Khlestkina, Dr. Sci. (Biology), Professor of the Russian Academy of Sciences (RAS), Director, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 42, 44, Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia; Institute of Cytology and Genetics SB RAS (ICG SB RAS), 10, Academician Lavrentiev Avenue, Novosibirsk, 630090 Russia; Vavilov Society of Geneticists and Breeders (VOGiS), 3, Podbelsky Highway, Pushkin, St. Petersburg, 196608 Russia, director@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-8470-8254

Alexey V. Kochetov, Dr. Sci. (Biology), Academician of the Russian Academy of Sciences (RAS), Professor of the RAS, Director, Institute of Cytology and Genetics SB RAS (ICG SB RAS), 10, Academician Lavrentiev Avenue, Novosibirsk, 630090 Russia; Vavilov Society of Geneticists and Breeders (VOGiS), 3, Podbelsky Highway, Pushkin, St. Petersburg, 196608 Russia, ak@bionet.nsc.ru, https://orcid.org/0000-0003-3151-5181

Anton A. Nizhnikov, Dr. Sci. (Biology), Professor of the Russian Academy of Sciences (RAS), Professor, Acting Head of Genetics and Biotechnology Department, St. Petersburg State University (SpbU), 7/9, Universitetskaya Embankment, St. Petersburg, 199034 Russia; Vavilov Society of Geneticists and Breeders (VOGiS); Head, Laboratory of Proteomics of Supra-Organismal Systems, All-Russia Research Institute of Agricultural Microbiology (ARRIAM), 3, Podbelsky Highway, Pushkin, St. Petersburg, 196608 Russia, nizhnikov@arriam.ru, https://orcid.org/0000-0002-8338-3494

Igor A. Tikhonovich, Dr. Sci. (Biology), Academician of the Russian Academy of Sciences (RAS), Professor, Dean of the Faculty of Biology, St. Petersburg State University (SPbU), 7/9, Universitetskaya Embankment, St. Petersburg, 199034 Russia; President, Vavilov Society of Geneticists and Breeders (VOGiS); Scientific Director, All-Russia Research Institute of Agricultural Microbiology (ARRIAM), 3, Podbelsky Highway, Pushkin, St. Petersburg, 196608 Russia, igor.tikhonovich49@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8968-854X

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 12.02.2024; одобрена после рецензирования 25.02.2024; принята к публикации 29.02.2024.

The article was submitted on 12.02.2024; approved after reviewing on 25.02.2024; accepted for publication on 29.02.2024.

Биотехнология и селекция растений / Plant Biotechnology and Breeding

Научный рецензируемый журнал / Scientific Peer Reviewed Journal

ISSN 2658-6266 (Print); ISSN 2658-6258 (Online) 4 номера в год (ежеквартально) / Publication frequency: Quarterly

https://biosel.elpub.ru; e-mail: pbi@vir.nw.ru

Языки: русский, английский / Languages: Russian, English

Индексируется в РИНЦ (НЭБ), 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, 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://biosel.elpub.ru http://www.vir.nw.ru/pbi/

https://www.elibrary.ru/title_about_new.asp?id=69575

Требования к статьям и правила рецензирования, электронный архив в открытом доступе и иная дополнительная информация размещены на сайте журнала https://biosel.elpub.ru / Full information for authors, reviewers, and readers (open access to electronic versions and subscription to print editions) can be found at https://biosel.elpub.ru

Прием статей через электронную редакцию на сайте журнала https://biosel.elpub.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://biosel.elpub.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: *д.б.н. Е.И. Михайлова* Переводчик: *С.В. Шувалов* Корректор: *С.В. Шувалов , Е.И. Михайлова* Компьютерная верстка: *Г.К. Чухин*

Адрес редакции:

Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 42 Тел.: (812) 314-49-14; e-mail: pbi@vir.nw.ru; i.kotielkina@vir.nw.ru

Почтовый адрес редакции

Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 42, 44

Подписано в печать 28.03.2024. Формат 70×100¹/₈. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 9. Тираж 30 экз. Заказ № 382/3.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова» (ВИР), редакционно-издательский сектор ВИР

Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 42

Отпечатано в типографии ООО «Р-КОПИ» 190000, Санкт-Петербург, пер. Гривцова, д. 6, лит. Б



БИОТЕХНОЛОГИЯ И СЕЛЕКЦИЯ РАСТЕНИЙ

7(1), 2024