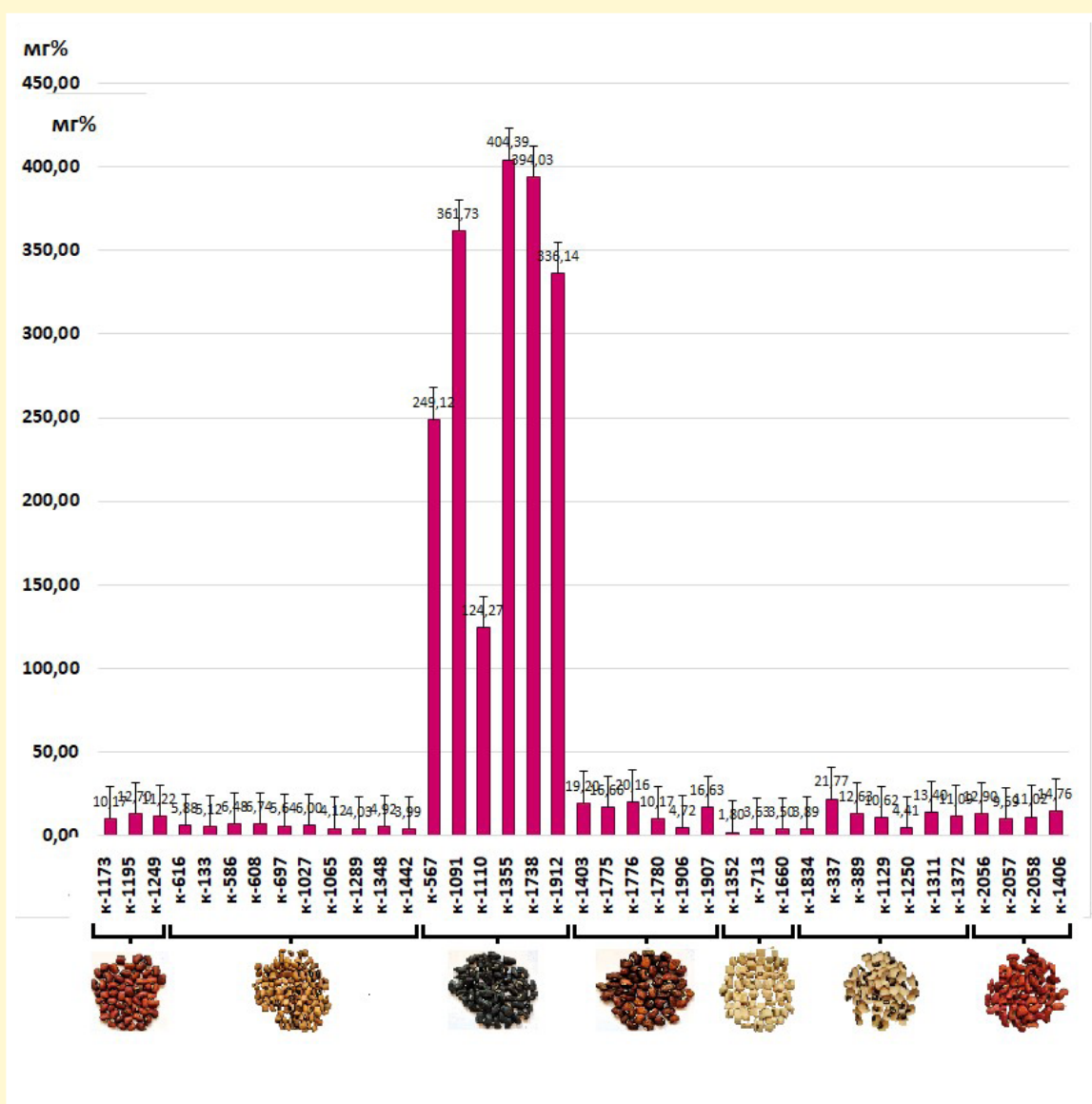


# БИОТЕХНОЛОГИЯ И СЕЛЕКЦИЯ РАСТЕНИЙ

9(1), 2026



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

2026, 9(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](mailto:pbi@vir.nw.ru)

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

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

DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1  
УДК: 573.6:631.527

ПИ № ФС77-74475  
ISSN: 2658-6266 (Print)  
ISSN: 2658-6258 (Online)

#### На обложке:

**Фото:** Содержание антоцианов в семенах *Vigna unguiculata* с разной окраской семенной кожуры

**Материалы к статье:** Попов В.С., Никифоров А.А., Сафонова Э.Э., Шеленга Т.В., Крылова Е.А., Бурляева М.О. Питательная ценность образцов *Vigna unguiculata* (L.) Walp. с разным цветом семян. *Биотехнология и селекция растений*. DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-04

SCIENTIFIC PEER REVIEWED JOURNAL

# PLANT BIOTECHNOLOGY AND BREEDING

2026, 9(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](mailto: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:

**Photo:** The content of anthocyanins in *V. unguiculata* seeds with different seed coat color

**Materials for the article:** Popov V.S., Nikiforov A.A., Safonova E.E., Shelenga T.V., Krylova E.A., Burlyayeva M.O. Nutritional value of *Vigna unguiculata* (L.) Walp. accessions with different seed color. *Plant Biotechnology and Breeding*. DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-04

## Биотехнология и селекция растений

2026 Том 9 № 1

DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1  
<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 № ФС77-74475 от 30 ноября 2018 г.

**Учредитель:** Федеральное государственное бюджетное научное учреждение

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

**Адрес учредителя:** Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 42, 44

### Главный редактор:

**Е. К. Хлесткина** – д.б.н.,  
член-корреспондент 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** (Россия)

### 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)  
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., профессор РАН, академик РАН (Россия)  
А. В. Кильчевский – д.б.н., академик НАНБ (Беларусь)  
Н. А. Колчанов – д.б.н., академик РАН (Россия)  
В. Н. Корзун – д.б.н. (Германия)  
А. В. Кочетов – д.б.н., профессор РАН, академик 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 – к.с.-х.н. (Казахстан)  
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)

### Редакционная коллегия:

Е. Е. Андронов – д.б.н. (Россия)  
Д. А. Афонников – д.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., член-корреспондент РАН (Россия)  
Т. А. Гасанова – к.с.-х.н. (Россия)  
С. В. Герасимова – к.б.н. (Россия)  
М. С. Гинс – д.б.н., профессор РАН, член-корреспондент РАН (Россия)  
С. В. Гончаров – д.б.н. (Россия)  
Р. О. Давоян – д.б.н. (Россия)  
Я. Н. Демуринов – д.б.н. (Россия)  
М. Г. Дивашук – к.б.н. (Россия)  
Е. В. Думачева – д.б.н. (Россия)  
С. Н. Еланский – д.б.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., член-корреспондент 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)  
С. В. Кушнаренко – к.б.н. (Казахстан)  
И. Н. Леонова – д.б.н. (Россия)  
И. Е. Лихенко – 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., член-корреспондент РАН (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)  
К. Г. Ткаченко – д.б.н. (Россия)  
Е. К. Турусупев – к.б.н., академик НАН РК (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)  
О. Ю. Шоева – к.б.н. (Россия)  
Л. А. Эльконин – д.б.н. (Россия)  
Г. В. Якуба – к.б.н. (Россия)

## Plant Biotechnology and Breeding

2026 Volume 9 No 1  
DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1  
<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 (VIR)  
Founder's address: 42, 44, Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190000, Russia

### Editor-in-Chief:

**E. K. Khlestkina** – Dr. Sci. in Biol.,  
Corr. Member of the RAS (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** (Russia)

### 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 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., Professor of the RAS, Full Member of the RAS (Russia)  
P. N. Kharchenko – Dr. Sci. in Biol., Full Member of the RAS (Russia)  
A. V. Kilchevsky – Dr. Sci. in Biol., Corr. Member of the NAS of Belarus (Belarus)  
A. V. Kochetov – Dr. Sci. in Biol., Professor of the RAS, Full Member of the RAS (Russia)  
N. A. Kolchanov – Dr. Sci. in Biol., Full Member of the RAS (Russia)  
V. N. Korzun – Dr. Sci. in Biol. (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 – Cand. Sci. in Agricul. (Kazakhstan)  
A. A. Romanenko – Dr. Sci. in Agricul., Full Member of the RAS (Russia)  
V. Roychev – Dr. Sci. in Agricul. (Bulgaria)  
A. V. Ryndin – Dr. Sci. in Agricul., Full Member of the RAS (Russia)  
E. N. Sedov – Dr. Sci. in Agricul., Full Member of the RAS (Russia)  
I. A. Tikhonovich – Dr. Sci. in Biol., Full Member of the RAS (Russia)

### Editorial board:

D. A. Afonnikov – Dr. Sci. in Biol. (Russia)  
E. E. Andronov – Dr. Sci. in Biol. (Russia)  
A. H. Bajmiev – Dr. Sci. in Biol. (Russia)  
I. A. Belan – Cand. Sci. in Agricul. (Russia)  
A. 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)  
E. V. Dumacheva – Dr. 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., Corr. Member of the RAS (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., Professor of the RAS, 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)  
N. N. Kovalenko – Dr. Sci. in Biol. (Russia)  
V. S. Kovalev – Dr. Sci. in Agricul. (Russia)  
B. R. Kuluev – Dr. Sci. in Biol. (Russia)  
K. U. Kurkiev – Dr. Sci. in Biol. (Russia)  
S. V. Kushnarenko – Cand. Sci. in Biol. (Kazakhstan)  
I. N. Leonova – Dr. Sci. in Biol. (Russia)  
I. E. Lihenko – 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., Corr. Member of the RAS (Russia)  
E. I. Mikhailova – Dr. Sci. in Biol. (Russia)  
S. V. Osipova – Dr. Sci. in Biol. (Russia)  
V. N. Podorozhnyi – Cand. Sci. in Agricul. (Russia)  
T. G. Prichko – Dr. Sci. in Agricul. (Russia)  
T. A. Rozhmina – Dr. Sci. in Biol. (Russia)  
O. Yu. Shoeva – Cand. Sci. in Biol. (Russia)  
A. V. Smykov – Dr. Sci. in Agricul. (Russia)  
A. A. Soloviev – Dr. Sci. in Biol., Professor of the RAS (Russia)  
I. I. Suprun – Cand. Sci. in Biol. (Russia)  
K. G. Tkachenko – Dr. Sci. in Biol. (Russia)  
Ya. A. Tsepilov – Cand. Sci. in Biol. (Russia)  
E. K. Turuspekov – Cand. Sci. in Biol., Full Member of the NAS RK (Kazakhstan)  
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., Corr. Member of the RAS (Russia)

## СОДЕРЖАНИЕ

### ОТ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА 4

*Е. К. Хлесткина*  
ВСТУПИТЕЛЬНАЯ СТАТЬЯ

### РАЗВИТИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ СЕЛЕКЦИИ 6

*Попов В.С., Никифоров А.А., Сафонова Э.Э., Шеленга Т.В., Крылова Е.А., Бурляева М.О.*  
*Научная статья*  
Питательная ценность образцов *Vigna unguiculata* (L.) Walp. с разным цветом семян

### ИЗУЧЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ГЕНЕТИКИ 18

*Костенко В.В., Баранова Н.Б., Асхадуллин Д-р.Ф., Асхадуллин Д-л.Ф., Пономарева М.Л.*  
*Научная статья*  
Комплексная оценка устойчивости сортов яровой мягкой пшеницы татарстанской селекции к бурой ржавчине с использованием молекулярно-генетических и полевых методов

*Макаов А.К., Радченко О.Е., Яремкив А.И., Антонова О.Ю.* 29  
*Научная статья*

Оценка эффективности маркеров S-локуса для выявления самофертильных форм на материале коллекции косточковых культур Майкопской опытной станции – филиала ВИР

### СОХРАНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ 38

*Дунаева С.Е., Малышев Л.Л., Лисицына О.В., Гавриленко Т.А.*  
*Научная статья*

Криоконсервация российских сортов малины и их долгосрочное хранение в криобанке ВИР

*Рахмангулов Р.С., Тихонова Н.Г., Иванов А.А., Ерастенкова М.В., Межина К.М., Евдокимов Е.В., Ухатова Ю.В., Хлесткина Е.К.* 49  
*Научная статья*

Оценка регенерационного потенциала каллусной ткани сортов *Actinidia chinensis* var. *deliciosa* (A. Chev.) C.F. Liang & A.R. Ferguson в культуре *in vitro*

### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ 64

*Хлесткина Е.К.*  
*Краткое сообщение*

Биологические коллекции для здоровья и долголетия: тренды в использовании генетических ресурсов растений

## CONTENTS

### FROM THE EDITOR IN CHIEF 4

*E. K. Khlestkina*  
INTRODUCTORY ARTICLE

### DEVELOPMENT OF MODERN BREEDING METHODS 6

*Popov V.S., Nikiforov A.A., Safonova E.E., Shelenga T.V., Krylova E.A., Burlyaeva M.O.*  
*Original article*  
Nutritional value of *Vigna unguiculata* (L.) Walp. accessions with different seed color

### STUDY OF PLANT GENETIC RESOURCES USING MOLECULAR GENETICS METHODS 18

*Kostenko V.V., Baranova N.B., Askhadullin D-r.F., Askhadullin D-l.F., Ponomareva M.L.*  
*Original article*  
Comprehensive evaluation of brown rust resistance in Tatarstan spring bread wheat cultivars using molecular genetics and field methods

*Makaov A.K., Radchenko O.E., Yaremiv A.I., Antonova O.Yu.* 29  
*Original article*

The evaluation of the effectiveness of S-locus markers for identifying self-fertile forms using the material from the stone fruit collection of the Maykop Experimental Station – Branch of VIR

### CONSERVATION OF PLANT GENETIC RESOURCES USING BIOTECHNOLOGICAL APPROACHES 38

*Dunaeva S.E., Malyshev L.L., Lisitsyna O.V., Gavrilenko T.A.*  
*Original article*

Cryopreservation of Russian raspberry cultivars and their long-term storage in the VIR cryobank

*Rakhmangulov R.S., Tikhonova N.G., Ivanov A.A., Erastenkova M.V., Mezhdina K.M., Evdokimov E.V., Ukhatova Yu.V., Khlestkina E.K.* 49  
*Original article*

Evaluation of the regenerative potential of callus tissue in *Actinidia chinensis* var. *deliciosa* (A.Chev.) C.F. Liang & A.R. Ferguson cultivars in *in vitro* culture

### BRIEF COMMUNICATIONS 64

*Khlestkina E.K.*  
*Brief communication*

Biological collections for health and longevity: trends in the plant genetic resources utilization



**Уважаемые читатели!**

В текущем выпуске мы уделяем внимание работам, важным для развития маркер-ориентированной селекции растений, исследованиям в сфере сохранения и использования генетических ресурсов растений с применением методов *in vitro* и *in cryo*, а также работам, создающим основу для развития селекции растений на повышенное содержание биологически активных веществ (БАВ).

В статье В.В. Костенко с соавторами представлены результаты генотипирования современных сортов яровой мягкой пшеницы с акцентом на сорта, созданные/ выращиваемые в Республике Татарстан: параллельно с полевой оценкой устойчивости к бурой листовой ржавчине проведен анализ ДНК-маркеров генов устойчивости *Lr9*, *Lr19*, *Lr24*, *Lr34*, *Lr46*, выявлено наличие гена *Lr9* у 70% изучаемых сортов. Наибольшая устойчивость к бурой ржавчине выявлена у сортов 'Наставник' (*Lr9+Lr24+Lr46*), 'Хазинэ' (*Lr19+Lr24*) и 'Чистопольская' (*Lr9+Lr24+Lr34*). Полученные результаты обосновывают подходы к планированию программ по маркер-ориентированной селекции

для данного региона с учетом пирамидирования определенных генов *Lr*.

В статье А.К. Макаова с соавторами исследована способность более 250 образцов косточковых культур формировать плоды при опылении собственной пылью. Установлены частоты встречаемости самофертильных образцов: у гексаплоидной сливы домашней 56,1%, а у алычи 7,4%. При этом согласно анализу ДНК ряд самофертильных образцов полиплоидной сливы не имеют сопряженного с этим признаком аллеля *S17*, а значит они представляют интерес для поиска у них других мутантных вариантов, приводящих к нарушению механизмов деградации собственных пыльцевых трубок. Выявленные самофертильные образцы с подтвержденным наличием аллеля *S17* могут быть использованы в качестве исходного материала для маркер-контролируемого создания самофертильных форм.

С.Е. Дунаева с соавторами сообщили о пополнении криоколлекции образцов малины, хранящейся в криобанке ВИР, одиннадцатью сортами, среди которых наблюдалась изменчивость по способности к посткриогенной регенерации. Эти сорта заложены на долгосрочное хранение в криобанк ВИР из расчета не менее 90 эксплантов на образец.

Статья Р.С. Рахмангулова с соавторами посвящена вопросам индукции каллусогенеза с последующей пролиферацией у перспективных сортов *Actinidia chinensis* var. *deliciosa* в условиях *in vitro*. Проведенная сравнительная оценка позволила рекомендовать наиболее эффективные протоколы для всех этапов, начиная от стерилизации до введения в культуру *in vitro*, а также выявить сорта 'Наувард' и 'Allison' с наибольшим количеством регенерантов.

В.С. Попов с соавторами определяли питательную ценность образцов *Vigna unguiculata* из коллекции ВИР разного эколого-географического происхождения, имеющих разную

окраску семенной кожуры. Оценка содержания белка, крахмала, антоцианов, каротиноидов,  $\beta$ -каротина и хлорофиллов в семенах позволила выявить по комплексу изученных свойств наиболее ценные образцы, к-1738 и к-567, которые могут быть рекомендованы в качестве источников для создания сортов пищевого назначения с высоким потенциалом для сохранения здорового долголетия человека.

Трудно переоценить роль генетических ресурсов культурных растений во всем их видовом и сортовом разнообразии и богатстве содержащихся в их биомассе питательных веществ и БАВ для развития направлений специализированного питания. Однако, компоненты для функционального и специализированного питания – это не только БАВ, извлеченные из какого-либо сырья, и применяемые в виде добавок. Биофортификация сортов растений, из которых производят повседневные продукты пита-

ния – вот важная основа для современного диетического и функционального питания. Этой тематике посвящен представленный в выпуске миниобзор «Биологические кол-лекции для здоровья и долголетия: тренды в использовании генетических ресурсов растений».

Уважаемые коллеги, рады сообщить, что 12-15 мая в Санкт-Петербурге состоится IV научный форум «Генетические ресурсы России». Мероприятие объединит ведущих исследователей и молодых ученых которые представят доклады по различным направлениям – от сохранения биологического разнообразия и технологий работы с генетическими ресурсами до активного долголетия, биоэкономики и гербарной геномики. Программу научного форума можно найти по ссылке <https://forumgenres.ru>. Приглашаем слушателей принять участие в мероприятии, которое пройдет на площадке Санкт-Петербургского отделения РАН.

*Главный редактор,  
член-корреспондент РАН  
Е.К. Хлесткина*

Научная статья

УДК 581.192.2:635.654.3

DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-04



## Питательная ценность образцов *Vigna unguiculata* (L.) Walp. с разным цветом семян

В.С. Попов, А.А. Никифоров, Э.Э. Сафонова\*, Т.В. Шеленга, Е.А. Крылова, М.О. Бурляева

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

*Автор, ответственный за переписку:* Эльвира Эмильевна Сафонова, e.safonova@vir.nw.ru

**Актуальность.** Вигна китайская *Vigna unguiculata* (L.) Walp. издавна культивируется в Африке, юго-восточной Азии и Америке. Семена *V. unguiculata* известны своими вкусовыми качествами и содержат высокое количество белков, углеводов, макро- и микроэлементов, биологически активных соединений. Отмечаются антиоксидантные, антиканцерогенные и антибактериальные свойства культуры. Продукты, приготовленные из семян и бобов *V. unguiculata*, обладают диетической ценностью и входят в рационы питания людей, заботящихся о своем здоровье. Целью работы являлось определение питательной ценности образцов *V. unguiculata* из коллекции ВИР разного эколого-географического происхождения и имеющих разную окраску семенной кожуры. **Материалы и методы.** Для исследования были подобраны 39 образцов из коллекции ВИР. Изучали содержание белка, крахмала, антоцианов, каротиноидов,  $\beta$ -каротина и хлорофиллов в семенах. Количество антоцианов в семенах определяли в спиртовых экстрактах спектрофотометрическим методом, белка – по Кьельдалю, крахмала – по Эверсу, хлорофиллы, каротиноиды и  $\beta$ -каротин – спектрофотометрическим методом. **Результаты.** Диапазон варьирования количества антоцианов в семенах достаточно широк: от 1,8 до 404,4 мг%. Наиболее высокие показатели отмечены у семян с чёрной окраской (124,3-404,4 мг%), меньшие – у белосемянных (1,8-3,9 мг%). Содержание общего белка находилось в пределах 18,8-30,5%, крахмала – 42,6-57,1%, хлорофиллов *a* и *b* – от 0,13 до 3,7 мг%. Каротиноиды и  $\beta$ -каротин обнаружены в минимальных количествах: 0,07-0,72 мг% и 0,01-0,14 мг% соответственно. **Заключение.** В нашем опыте содержание антоциана в семенах влияло на цвет семенной кожуры, но не оказывало воздействие на показатели белка, крахмала, каротиноидов и  $\beta$ -каротина. Также наблюдалась достоверная ассоциация между содержанием каротиноидов в семенах и эколого-географическим происхождением образца. Выявлена положительная корреляция ( $r > 0,8$ ) между содержанием хлорофиллов и  $\beta$ -каротина, между  $\beta$ -каротином и каротиноидами, отрицательная – между содержанием крахмала и белка ( $r = -0,81$ ). Лучшую питательную ценность по комплексу изученных признаков имели образцы к-1738 ‘Сибирский размер’ (Россия) и к-567 (Индия).

**Ключевые слова:** белок, крахмал, антоцианы, каротиноиды, хлорофиллы,  $\beta$ -каротин, китайская вигна

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту FGEM-2022-0002 «Выявление возможностей генофонда бобовых культур для оптимизации их селекции и диверсификации использования в различных отраслях народного хозяйства».

**Для цитирования:** Попов В.С., Никифоров А.А., Сафонова Э.Э., Шеленга Т.В., Крылова Е.А., Бурляева М.О. Питательная ценность образцов *Vigna unguiculata* (L.) Walp. с разным цветом семян. *Биотехнология и селекция растений*. 2026;9(1):6-17. DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-04

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.

© Попов В.С., Никифоров А.А., Сафонова Э.Э., Шеленга Т.В., Крылова Е.А., Бурляева М.О., 2026

---

Original article

DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-04

## Nutritional value of *Vigna unguiculata* (L.) Walp. accessions with different seed color

Vitaliy S. Popov, Artur A. Nikiforov, Elvira E. Safonova\*, Tatiana V. Shelenga, Ekaterina A. Krylova, Marina O. Burlyaeva

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

**Corresponding author:** Elvira E. Safonova, e.safonova@vir.nw.ru

**Background.** Cowpea *Vigna unguiculata* (L.) Walp. has long been a cultivated crop in Africa, Southeast Asia, and the Americas. Cowpea seeds are renowned for their delicious flavor and high protein, carbohydrate, macro- and micronutrient content, and bioactive compounds. The crop is known for its antioxidant, anticarcinogenic and antibacterial properties. Food products made from cowpea seeds have nutritional value and are a staple in the diets of health-conscious individuals. The aim of the work was to determine the nutritional value of seeds of *V. unguiculata* accessions from the VIR collection of different ecogeographical origin, having different colors of the seed coat. **Materials and methods.** Thirty-nine accessions from the VIR collection were chosen for the study. The content of nutritious and bioactive compounds, i.e. protein, starch, anthocyanins, carotenoids,  $\beta$ -carotene and chlorophylls was determined. The variation of the anthocyanin content was revealed depending on the seed color. The amount of anthocyanins in seeds was determined by spectrophotometry, of protein by Kjeldahl, and starch by Evers. Chlorophyll, carotenoids and beta-carotene were determined spectrophotometrically. **Results.** The range of variation of the anthocyanins content in seeds is quite wide from 1.8 to 404.4 mg%. The highest values were noted in black seeds (124.3-404.4 mg%). The content of total protein was within 18.8-30.5%, the range of starch variation was 42.6-57.1%, the content of chlorophylls *a* and *b* ranged from 0.13 to 3.7 mg%, and carotenoids and  $\beta$ -carotene were found in minimal quantities of 0.07-0.72 mg% and 0.01-0.14 mg%, respectively. **Conclusion.** In our experiment, the anthocyanin content of seeds influenced the color of the seed coat, but did not affect the protein, starch, carotenoid, and  $\beta$ -carotene levels. A significant association was also observed between the carotenoid content of seeds and the ecogeographical origin of the accession. A positive correlation ( $r>0.8$ ) was found between the chlorophyll and  $\beta$ -carotene content, and between  $\beta$ -carotene and carotenoids, while a negative correlation was found between the starch and protein content ( $r=-0.81$ ). The accessions k-1738 'Sibirski Razmer' (Russia) and k-567 (India) demonstrated the best nutritional value for the complex of traits studied.

**Keywords:** protein, starch, anthocyanins, carotenoids, chlorophylls,  $\beta$ -carotene, vigna, cowpea

---

**Acknowledgements:** the work was performed within the framework of the State Assignment according to the Theme Plan of VIR, Project No. FGEM-2022-0002 "Identifying possibilities in the genetic diversity of leguminous crops to optimize their breeding and diversify uses in various sectors of the national economy"

**For citation:** Popov V.S., Nikiforov A.A., Safonova E.E., Shelenga T.V., Krylova E.A., Burlyaeva M.O. Nutritional value of *Vigna unguiculata* (L.) Walp. accessions with different seed color. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2026;9(1):6-17. DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-04

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.

---

© Popov V.S., Nikiforov A.A., Safonova E.E., Shelenga T.V., Krylova E.A., Burlyaeva M.O., 2026

## Введение

Вигна китайская *Vigna unguiculata* (L.) Walp. – однолетнее растение, отличающееся высокой засухоустойчивостью, а также относительно высокой урожайностью семян и надземной биомассы. Культура возделывается с давних времён и по сводкам FAO является одной из самых широко распространённых среди зернобобовых в мире (FAOSTAT, 2024). В последнее десятилетие во многих странах наблюдается рост посевных площадей и производства семян *V. unguiculata*. В 2016 году в мире было выращено около семи миллионов тонн, что в 3,3 раза больше, чем в 1990 году (Orita et al., 2019), а в 2023 году по данным FAO было собрано более 9,5 миллионов тонн (FAOSTAT, 2024). Основным регионом культивирования *V. unguiculata* является Африка, в частности Нигерия и Нигер, на которые приходится более 90% мирового производства *V. unguiculata* (Orita et al., 2019). Высокая устойчивость к жаре и засухе делает эту культуру универсальной для выращивания в странах с жарким климатом, особенно в условиях его глобального изменения (Boukar et al., 2019; Carvalho et al., 2022).

*V. unguiculata* ценится за высокие вкусовые качества семян и бобов и используется в пищу во многих странах. Ее семена считаются хорошим источником питательных и фитохимических веществ, таких как минералы (железо и цинк), витамины (фолиевая кислота и комплекс витаминов группы В), пищевые волокна, ненасыщенные жирные кислоты и фенольные соединения (Carvalho et al., 2022). Многие вещества, полученные при употреблении *V. unguiculata* в пищу, оказывают благоприятное действие на организм человека и поддержание его здоровья, особенно при хронических сердечно-сосудистых заболеваниях, желудочно-кишечных расстройствах, диабете, ожирении, а также при некоторых видах рака (Carvalho et al., 2022). Семена *V. unguiculata* применяются в различных диетах и популярны, как продукты здорового, диетического и лечебного питания. Кроме того, *V. unguiculata* используется как альтернативный источник растительного белка для людей, страдающих аллергической реакцией на соевый белок (Frota et al., 2008). Среди полезных свойств *V. unguiculata*, особое внимание привлекает её антиоксидантная активность, поскольку избыточное производство активных форм кислорода/азота в организме человека участвует в патогенезе старения и развитии многих распространённых заболеваний (Ames et al., 1993).

Семена *V. unguiculata* различаются по цвету семенной кожуры, они имеют цвет от насыщенно чёрного до белого. У ряда образцов на семенной кожуре различной конфигурации и размеров наблюдается наличие точек или пятнистость. Цвет семян обусловлен наличием в семенной кожуре различных пигментов: антоцианов, каротиноидов, хлорофиллов и др.

Культура характеризуется устойчиво высоким содержанием белка (до 38,5%) и крахмала (до 56,6%) в семе-

нах (Perchuk et al., 2020). Согласно данным литературы, у видов, родственных *V. unguiculata*, содержание белка в среднем составляет: у маша *Vigna radiata* (L.) R. Wilczek. – 30,21% (Wang et al., 2021), у сои *Glycine max* (L.) Merr. – 44,17% (Sinegovskaya et al., 2020), у фасоли *Phaseolus vulgaris* L. – 26,01% (Egorova et al., 2019). Таким образом, по содержанию белка в семенах *V. unguiculata* занимает одно из ведущих мест среди культур, входящих в трибу Phaseoleae Bronn ex DC. Содержание крахмала в семенах *V. unguiculata* также выше, чем у других видов вигны и фасоли. Так у адзуки *Vigna angularis* (Willd.) Ohwi & H. Ohashi оно в среднем равняется 39,8% (Deepika et al., 2023), у рисовой фасоли *Vigna umbellata* L. – 32,8% (Chavan et al., 2009), в проростках *V. radiata* – 38,56% (Wang et al., 2021), в семенах разных сортов *P. vulgaris* варьирует от 39,68% до 43,78% (Marquezi et al., 2021).

Известно, что семена *V. unguiculata* с красно-коричневой или чёрной кожурой содержат антоцианы (Ha et al., 2010), в меньшей степени флавонолы (Cai et al., 2003) и проантоцианидины (Hachibamba et al., 2013), которые относят к полифенольным соединениям (Orita et al., 2019) и используют в медицине для улучшения здоровья человека (Zhou et al., 2024). Важно отметить, что антоцианы определяют не только пигментацию, но и играют роль в ответе растений на различные биологические и абиотические стрессы. В семенах *V. unguiculata* содержание антоцианов колеблется от 1,14 до 175,16 мг% (Krylova et al., 2023), у *V. angularis* – в пределах 3,14-7,94 мг% (Han et al., 2015). В семенах *V. radiata* обнаружены дельфинидин и цианидин в количестве 5,19-5,70 мг%. У сортов *P. vulgaris* с красными семенами выявлено 6,07-7,35 мг% антоцианов, у чечевицы (*Lens culinaris* Medik.) – 13,67-15,99 мг%, у кормовых бобов (*Vicia faba* L.) – 3,74-9,25 мг% (Kan et al., 2018). В чёрных семенах сои *G. max* с зелеными семядолями этот показатель находится в пределах от 260 до 2430 мг% (Jo et al., 2021).

Из биологически активных веществ в растениях *V. unguiculata* также обнаружены различные каротиноиды, которые являются вторыми по распространённости природными жирорастворимыми пигментами на земле, синтезируемыми растениями и выполняющими важные физиологические функции (Sodedji et al., 2024). Они полезны для здоровья человека, способствуют укреплению антиоксидантной защиты организма и снижают риск развития рака, заболеваний глаз и возрастных заболеваний (Sodedji et al., 2024). Уровень содержания каротиноидов в семенах *V. unguiculata* (0,0-0,1 мг/100 г), ниже, чем в семенах других зерновых бобовых культур, включая нут (0,8-3,0 мг/100 г) и горох (0,06-2,80 мг/100 г) (Sodedji et al., 2022), чечевицу (4,53-21,34 мкг/г сухого веса), красносемянную фасоль (8,29-20,95 мкг/г сухого веса) (Kan et al., 2018), желтосемянный горох (7-12 мкг/г) и зеленосемянный горох (16-21 мкг/г) (Ashokkumar et al., 2014).

В листьях высших растений вместе с другими каротиноидами синтезируется β-каротин, являющийся пред-

шественником витамина А, который регулирует окислительно-восстановительные процессы и обеспечивает синтез многих гормонов. У конских бобов, нута, чечевицы и фасоли содержание  $\beta$ -каротина незначительно и составляет 0,089, 0,077, 0,157 и 0,039 мкг/г соответственно (El-Qudah et al., 2014). Содержание  $\beta$ -каротина в ростках *V. unguiculata* в среднем равняется 13,2 мг% (Sodedji et al., 2022). Хотя бобовые содержат относительно низкое количество каротиноидов, они могут обеспечить количество, необходимое для поддержания здоровья человека (El-Qudah et al., 2014).

Информация о количественных показателях содержания хлорофиллов в семенах и листьях зернобобовых культур в научных источниках встречается крайне редко. Так листья *V. unguiculata* накапливают 0,692 мг/г хлорофилла *a*, 0,505 мг/г хлорофилла *b* и 1,197 мг/г общего хлорофилла (Talekar, 2022). Данные о содержании хлорофиллов в семенах *V. unguiculata* нами не обнаружены, хотя у этого вида существуют сорта с зеленым цветом семядолей, в которых хлорофилл сохраняется даже после созревания. Известно, что зеленая окраска семядолей связана со многими полезными для питания признаками, например, у нута – с высоким содержанием каротиноидов и хлорофиллов (Sivasakthi et al., 2019), у сои – с отсутствием антипитательных веществ (ингибитора трипсина Кунитца, лектинов и др.). Поэтому сейчас одним из направлений селекции сои и нута является создание сортов с зелеными семядолями, в которых наличие антипитательных и аллергенных факторов минимально (Sivasakthi et al., 2019; Choi et al., 2021;).

В мире широко культивируется небольшое число сортов *V. unguiculata*, различающихся по цвету семенной кожуры. Выбор сорта потребителями варьирует в разных регионах. На сегодняшний день информация о питательной ценности образцов с различной окраской семян ограничена, более точное знание этого вопроса позволит раскрыть потенциал культуры, расширить ассортимент сортов в сельскохозяйственном производстве и увеличить ареал возделывания *V. unguiculata*.

**Целью работы** являлось определение питательной ценности семян образцов *V. unguiculata* из коллекции Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР), разного эколого-географического происхождения, имеющих разный цвет семян. Кроме того, в задачи исследования входило выявление взаимосвязей между происхождением образцов, цветом семенной кожуры и содержанием белка, крахмала, антоциана, каротиноидов и хлорофиллов в семенах.

## Материалы и методы

Для изучения из коллекции ВИР были отобраны 39 образцов семян *Vigna unguiculata* различного эколого-географического происхождения, а именно из Африки: Бенин (к-1906, к-1907), Бурунди (к-1289), Нигерия (к-1442, к-1372), Сомали (к-1173, к-1195), Танзания (к-1780),

Мадагаскар (к-1348); из Евразии: Абхазия (к-586), Вьетнам (к-1355, к-1912, к-1834), Дания (к-608), Индия (к-616, к-567), Иран (к-1129), Казахстан (к-1091), Лаос (к-1775, к-1776), Пакистан (к-1311), Португалия (к-1250), Россия (к-133, к-1738, к-2056, к-2057, к-2058), Таджикистан (к-697), Узбекистан (к-1027), Филиппины (к-1403, к-1406), Франция (к-1660); из Америки: Венесуэла (к-1352), Куба (к-389), Мексика (к-337), США (к-713, к-1249, к-1065); из Австралии (к-1110). В выборку включили семена белого, бежевого, бежевого с черными точками, вишневого, черного, красно-коричневого цвета, а также семена с черным и серым пятном вокруг рубчика.

Семена, взятые в исследование, репродуцировали на Астраханской опытной станции – филиале ВИР (АОС). Природная зона Астраханской области, представляющая собой пустыни и полупустыни, относится к умеренно-континентальному климатическому поясу. Средняя температура в годы выращивания образцов в этой области составила в июне 26,4, в июле – 28,3, в августе – 23,5, в сентябре – 18,6°C. Сумма активных температур за июнь-сентябрь составила 2955,1°C; сумма выпавших осадков – 33,1 мм (Weather and climate:..., 2024).

Биохимический анализ проводили в отделе биохимии и молекулярной биологии ВИР по методикам, утвержденным внутри института (Ermakov et al., 1987). Семена предварительно измельчали на лабораторной мельнице до состояния мелкодисперсной муки с размером частиц до 10 мкм. Навески для исследования брали из однородной средней пробы.

Количественное определение суммы антоцианов в семенах проводили в подкисленных спиртовых экстрактах согласно методике (Ogorodnova, Timofeeva, 2020). Анализ проводили с использованием центрифуги MPW-310 (MPW Medical Instruments, Польша), спектрофотометра LKB Biochrom NOVASPEC II (Amersham Pharmacia, Великобритания). Содержание суммы антоцианов в пересчете на цианидин-3,5-дигликозид в абсолютно сухом сырье в процентах (X) вычисляли по формуле (1):

$$X = \frac{D \cdot V \cdot V_2 \cdot 100}{453 \cdot m \cdot V_1 \cdot (100 - W)} \quad (1)$$

где: D – оптическая плотность испытуемого раствора; 453 – удельный показатель поглощения цианидин-3,5-дигликозида в подкисленном 1% соляной кислотой 80% этаноле; m – масса сырья, г; V, V<sub>1</sub> и V<sub>2</sub> – исходный объем и объемы разведения, см<sup>3</sup>; W – потеря в массе при высушивании сырья, %.

Содержание белка определяли по Кьельдалю (коэффициент пересчета азота на белок 6,25) по ГОСТ 10846-91 (ГОСТ 10846-91, 2009). В работе использовали ферментёр и анализатор белка VELP SCIENTIFICA UDK 159 (VELP, Италия).

Содержание крахмала определяли поляриметрическим методом по Эверсу (коэффициент пересчета 174,7) с помощью автоматического поляриметра/сахариметра

SAC-i (ATAGO, Япония) по ГОСТ 10845-98 (GOST 10845-98, 2009).

Содержание суммы хлорофиллов, каротиноидов и  $\beta$ -каротина определяли по методике Т.М. Пановой и А.А. Щеголева (Panova, Shchegolev, 2010). При анализе использовали центрифугу MPW-310 (MPW Medical Instruments, Польша), спектрофотометр LKB Biochrom NOVASPEC II (Amersham Pharmacia, Великобритания). Содержание каротиноидов и хлорофиллов *a* и *b* определяли в полученном экстракте без их предварительного разделения при следующих длинах волн: 440, 644, 662 нм. В качестве экстрагента и раствора сравнения применяли 100% ацетон.

Концентрацию пигментов (*C*, мкг/см<sup>3</sup>) рассчитывали по уравнениям, составленным на основании экспериментально полученных удельных коэффициентов поглощения по формулам (2-5):

$$C_{\text{хл.А}} = 9,784 \cdot E_{662} - 0,990 \cdot E_{644}; \quad (2)$$

$$C_{\text{хл.В}} = 21,426 \cdot E_{644} - 4,650 \cdot E_{662}; \quad (3)$$

$$C_{\text{хл.А+хл.В}} = 5,134 \cdot E_{662} + 20,436 \cdot E_{644}; \quad (4)$$

$$C_{\text{кар.}} = 4,659 \cdot E_{440,5} - 0,268 \cdot C_{\text{хл.А+хл.В}} \quad (5)$$

Содержание каждого пигмента (после расчёта концентрации пигментов в вытяжке) с учетом объема экстракта и навески вычисляли по формуле (6):

$$X = \frac{V \cdot C \cdot 100}{m \cdot 1000 \cdot (100 - W)} \quad (6)$$

где: *V* – объем спиртового экстракта, см<sup>3</sup>; *C* – концентрация пигмента в спиртовом растворе, мкг/см<sup>3</sup>; *m* – навеска сырья, г; *W* – потеря в массе при высушивании сырья, %.

Содержание  $\beta$ -каротина определяли в исходном растворе при 454 нм. Фактор пересчёта по калибровочной кривой *F*=0,521. Содержание вещества рассчитывали по формуле (7):

$$X = \frac{C \cdot V \cdot 100}{m \cdot 1000} \quad (7)$$

где *C* – концентрация  $\beta$ -каротина, полученная на спектрофотометре (мг%)

Влажность (сухое вещество) семян определяли методом высушивания до постоянной массы при помощи сушильного шкафа UNPlus160 (Mettler, Германия) согласно ГОСТ 9404-88 (GOST 9404-88, 2007).

Статистический анализ данных проводили в программе Statistica-7 для Windows (основные статистики, дисперсионный и корреляционный анализ; StatSoft, 1984-2021). Рассчитывали ранговые коэффициенты корреляции Спирмана. Значения коэффициента корреляции  $r \geq 0,70$  считали высокими, значения *r* в диапазоне от 0,50 до 0,70 – средними, значения  $r \leq 0,50$  – низкими (Shmidt, 1984). Считали коэффициенты корреляции достоверно

значимыми на 5% уровне значимости ( $p < 0,05$ ).

## Результаты

В нашем опыте содержание общего белка в семенах в среднем составляло 25,2% и варьировало в пределах 18,8-30,5%. Наибольшее содержание белка выявлено в семенах к-567 (Индия): 30,5%, наименьшее – у к-337 (Мексика): 19,1% (рис. 1).

Дисперсионный анализ не выявил достоверной ассоциации между содержанием белка и происхождением: *F* (24, 14)=1,4 при  $p=0,3$ , а также окраской семенной кожуры: *F* (7, 31)=0,6 при  $p=0,7$ .

Содержание крахмала в семенах было высоким практически у всех образцов, при этом среднее значение равнялось 50,1%, а диапазон изменчивости находился в пределах от 42,6 до 57,1%. Самые высокие показатели содержания крахмала наблюдались у к-1249 (США): 55,1%, а также у к-337 (Мексика): 56,1%; самые низкие – у к-1091 (Казахстан): 43,7%, а также у к-1738, ‘Сибирский размер’ (Россия): 43,8% (рис. 2).

Содержание крахмала в семенах не зависело от происхождения образца: *F* (24, 14)=1,71, при  $p=0,15$ . Между окраской семян и содержанием крахмала связь также не выявлена: *F* (7, 31)=0,96, при  $p=0,5$ .

Показатель содержания антоцианов в семенах у исследуемых образцов сильно варьировал – от 1,8 до 404,4 мг%, и его значение в среднем составило 55,9 мг% (рис. 3). Наиболее высокие значения параметра выявлены у семян с чёрной окраской: 124,3-404,4 мг% у к-567, к-1091, к-1110, к-1355, к-1738, к-1912; меньшие – у бежевых с чёрными точками: 4,7-20,2 мг% у к-1403, к-1775, к-1776, к-1780, к-1906, к-1907, а также у белых с чёрным пятном вокруг рубчика: 4,4-21,8 мг% у к-337, к-389, к-1129, к-1250, к-1311, к-1372. Самые низкие значения были у белых семян и белых с серым пятном у рубчика: 1,8-3,9 мг% у к-1352, к-713, к-1660, к-1834. По содержанию антоцианов выделились образцы с чёрными семенами к-1355 (Вьетнам) 404,4 мг% и к-1738 ‘Сибирский размер’ (Россия) 394,0 мг%. Низкими показателями по этому признаку характеризовались образцы с белой окраской семян к-1352 (Венесуэла) 1,8 мг% и к-1660 (Франция) 3,5 мг%.

Дисперсионный анализ показал достоверное влияние содержания антоцианов на окраску семенной кожуры: *F* (7, 31)=30,37, при  $p=0,00$ . Однако он не выявил ассоциации между количеством антоцианов и происхождением образца: *F* (24, 14)=0,709,  $p=0,78$ .

Вишнёвые семена: к-1173, к-1195, к-1249, а также красно-коричневые: к-2056, к-2057, к-2058, к-1406 характеризовались также небольшим содержанием антоцианов 10,2-12,7 мг% и 9,6-14,8 мг% соответственно. Видимо у образцов с вишнёвым и бежевым цветом семенной кожуры окраска обусловлена не антоцианами, а иными пигментами, что требует дальнейших исследований.

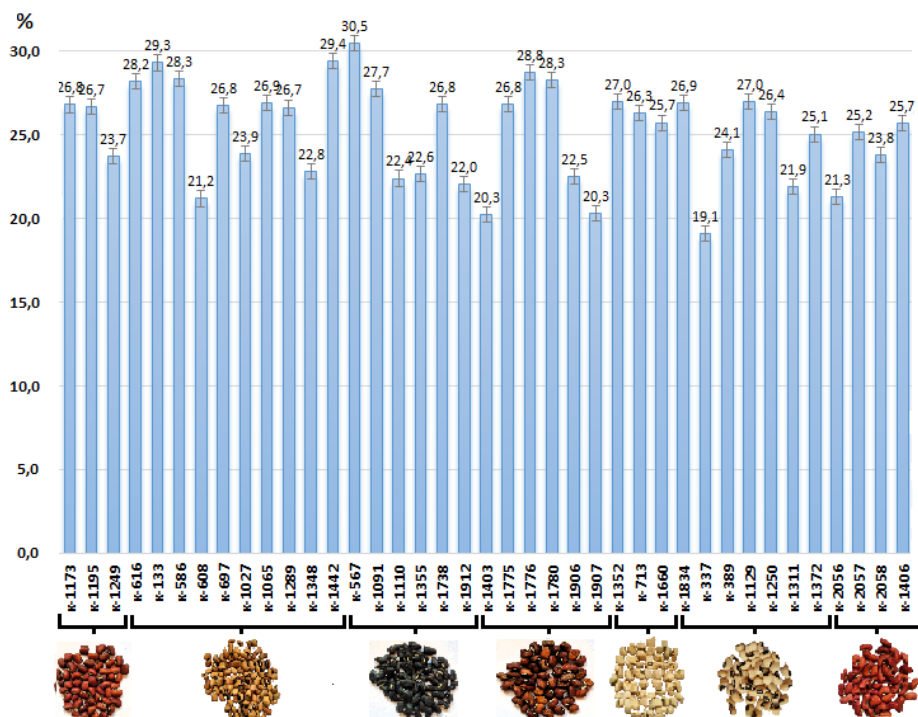


Рис. 1. Содержание белка в семенах *Vigna unguiculata* с разной окраской семенной кожуры

Fig. 1. Protein content in *V. unguiculata* seeds with different color of the seed coat

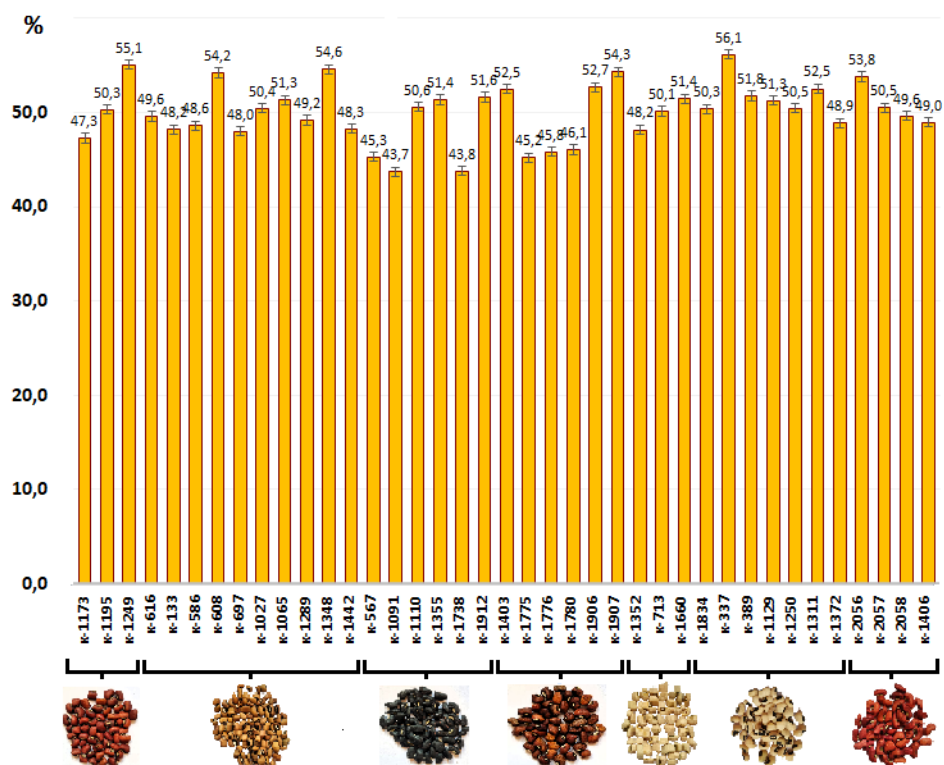


Рис. 2. Содержание крахмала в семенах *Vigna unguiculata* с разной окраской семенной кожуры

Fig. 2. Starch content in *V. unguiculata* seeds with different seed coat color

Содержание хлорофиллов, каротиноидов и  $\beta$ -каротина у исследуемых образцов *V. unguiculata* было достаточно низким (рис. 4). Диапазон варьирования количества хлорофиллов *a* и *b* в семенах находился в пределах от 0,13 до 3,66 мг% и в среднем равнялся 0,73 мг%, при этом содержание хлорофилла *b* примерно в 1,7 раза превышало содержание хлорофилла *a*. Наибольшее содержание хлорофиллов было у образцов к-1912 (Вьетнам), к-1173 (Сомали), к-1738 (Россия) и к-713 (США); наименьшее – у к-1775 (Лаос). Дисперсионный анализ не выявил связи между происхождением образцов и содержанием в их семенах хлорофиллов *a* и *b*:  $F(28, 10)=0,42$ , при  $p=0,97$ . В свою очередь содержание обоих типов хлорофиллов не влияло на окраску семян:  $F(7, 31)=1,17$ , при  $p=0,35$ .

Содержания каротиноидов в семенах было небольшим и колебалось от 0,07 до 0,72 мг%, средний показатель составил 0,17 мг%. Наибольшее содержание каротиноидов наблюдалось у образцов к-1173 (Сомали), к-1912 (Вьетнам) и к-713 (США); наименьшее – у к-1776 (Лаос). Следует отметить, что к-1912 имеет светло-зеленый цвет семядолей. Изучение влияния происхождения образцов на содержание каротиноидов показало достоверную ассоциацию:  $F(28, 10)=3,42$ , при  $p=0,02$ ), а окраска семенной кожуры не была связана с накоплением

в семенах этого вещества ( $F(7, 31)=1,51$ , при  $p=0,19$ ).

Содержание  $\beta$ -каротина в семенах выявлено в следовых количествах от 0,01 до 0,14 мг%, среднее значение составило 0,04 мг%. Самые высокие значения показателей были у к-1912 (Вьетнам), к-713 (США) и к-1173 (Сомали), самое низкое – у к-1775 (Лаос). Нами не установлено ассоциаций между происхождением образца и содержанием  $\beta$ -каротина в семенах: ( $F(28, 10)=0,71$ , при  $p=0,78$ ). Окраска семян также не обусловлена наличием в семенах этого вещества:  $F(7, 31)=1,29$ , при  $p=0,29$ .

Корреляционный анализ изученных признаков выявил сильные взаимосвязи между содержанием хлорофилла и  $\beta$ -каротина ( $r=0,95$ ), между  $\beta$ -каротином и каротиноидами ( $r=0,80$ ). Средняя корреляция наблюдалась между количеством хлорофилла и каротиноидов ( $r=0,61$ ), слабая, но достоверная между хлорофиллом и антоцианами ( $r=0,38$ ) и высокая отрицательная взаимосвязь была обнаружена между содержанием крахмала и белка ( $r=-0,81$ ).

## Обсуждение

В нашем опыте среднее содержание белка в семенах равнялось 25,2% (18,8–30,5%), полученные данные сопоставимы с результатами других публикаций. Так,

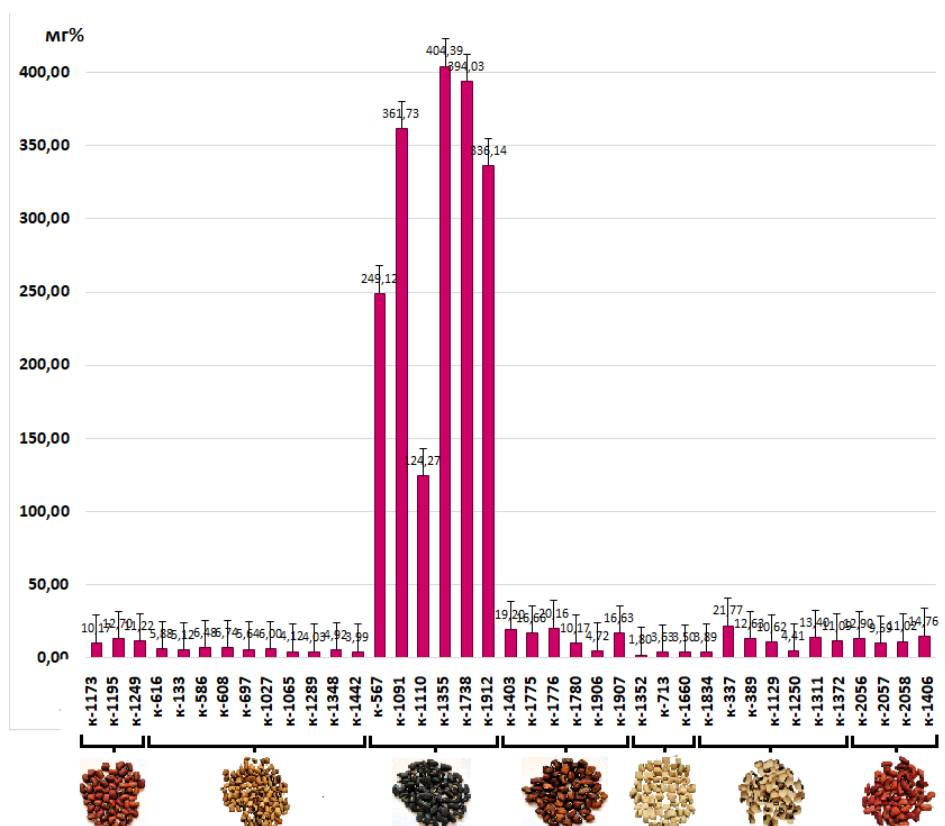


Рис. 3. Содержание антоцианов в семенах *Vigna unguiculata* с разной окраской семенной кожуры

Fig. 3. The content of anthocyanins in *V. unguiculata* seeds with different seed coat color

в статьях разных исследователей отмечается, что содержание белка в семенах *Vigna unguiculata* при возделывании в России может достигать 27,50% (Perchuk et al., 2020) и варьировать от 21,3 до 30,3% (Zhuzhukin et al., 2017), в США от 23,7 до 27,4% (Second Ravelombola et al., 2016), в Нигерии – от 15,06 до 38,50% (Ubini et al., 2016), в Китае – в пределах 17,30-27,23% (Bai et al., 2020), в Индии – от 19,4 до 27,9% (Padhi et al., 2022).

Содержание крахмала в семенах по нашим данным в среднем составляло 50,1% (42,6-57,1%). В статьях многих авторов также отмечены высокие показатели общего содержания крахмала в семенах. У разных сортов оно варьирует от 50,7 до 67,0% (Arora, Das, 1976), от 32,97 до 44,27% (Oke et al., 2015), от 50,99 до 51,33% (Naiker et al., 2019) и от 27,5 до 42,7% (Padhi et al., 2022).

Таким образом, вид *V. unguiculata* характеризуется относительно равным диапазоном варьирования значений содержания крахмала и белка в семенах при возделывании в разных странах. В наших исследованиях не была выявлена достоверная связь между происхождением образца и содержанием белка и крахмала в семенах; по-видимому, основную роль в данном случае играет генотип. Также не было обнаружено ассоциации между

цветом семян и содержанием белка и крахмала.

Содержание антоцианов в семенах в изученных нами образцах находилось в диапазоне от 1,8 мг% у образцов с белыми семенами до 404,4 мг% у тех, что характеризуются чёрными семенами. В работе Кан и сотрудников содержание антоцианов варьировало в пределах 3,38-10,65 мг% (Kan et al., 2018). В статье Крыловой и других (Krylova et al., 2023), как и в нашем опыте, доля антоцианов менялась в зависимости от цвета семян, от 0,00 мг% у белосемянных образцов, 2,96 у сортов с красновато-коричневой семенной кожурой и до 175,16 мг% у сортов с чёрными семенами. В другом исследовании содержание антоцианов у чёрносемянных образцов изменялось от 167,6 до 209,4 мг%, а в зеленых семенах составило 87,5 мг% (Ojwang et al., 2012). Достаточно большое количество этого вещества, 250 мг%, было определено у сортов с чёрной семенной кожурой и в других изысканиях (Ha et al., 2010). Резюмируя наши данные и результаты других исследователей можно сказать, что содержание антоцианов в семенах коррелирует с цветом семенной кожуры, но не зависит от происхождения образца.

Учитывая то, что чёрный цвет семян в большей степени обуславливают антоцианы, а их содержание в семе-

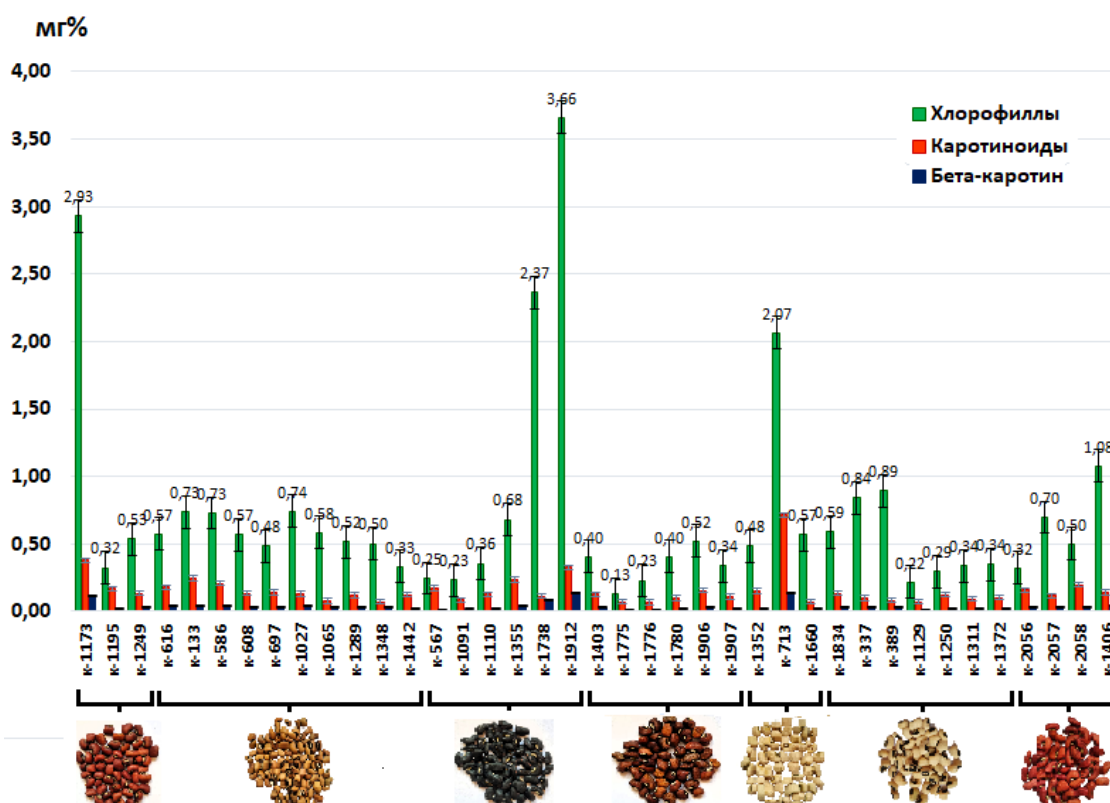


Рис. 4. Содержание хлорофилла, каротиноидов и β-каротина в семенах *Vigna unguiculata* с разной окраской семенной кожуры

Fig. 4. The content of chlorophyll, carotenoids and β-carotene in *V. unguiculata* seeds with different seed coat color

нах *V. unguiculata* с красной и коричневой окраской достаточно низкое, можно предположить, что цвет семян у последних зависит от других соединений, что требует дальнейшего исследования.

При изучении нашего материала мы идентифицировали небольшое количество  $\beta$ -каротина в семенах, а именно 0,04 мг% (от 0,01 до 0,14 мг%). В работах других авторов указывается также низкое содержание  $\beta$ -каротина в сухих семенах – от 0,00 до 0,01 мг% (Sodedji et al., 2024). А. Luthria и соавторы (Luthria et al., 2014) получили более высокие значения содержания  $\beta$ -каротина и их увеличение с  $12,91 \pm 5,46$  мг/100 г в сухих семенах до  $19,32 \pm 3,29$  мг/100 г в 2-дневных проростках. Анализ наших данных не выявил связи между цветом семян, происхождением образцов и наличием  $\beta$ -каротина в семенах, что, по-видимому, связано с наличием изменчивости по изучаемым признакам среди образцов, анализируемых разными авторами.

Исследования каротиноидов в сухих семенах *V. unguiculata* немногочисленны. По данным К.А.Ф. Sodedji и соавторов (Sodedji et al., 2024), общее содержание каротиноидов варьирует от 0,00 до 9,46 мкг/г, зависит от генотипа и степени зрелости семян. В нашем исследовании количество каротиноидов в семенах в среднем равнялось 0,16 мг% (0,07-0,72 мг%), наибольшими значениями показателя отличались образцы из США, России, Вьетнама и Сомали. Показатели этого признака были связаны, как с особенностями генотипа, так и с происхождением образца. Связь между цветом семян и количеством каротиноидов нами не обнаружена.

Диапазон варьирования количества хлорофиллов *a* и *b* в семенах в нашем опыте находился в пределах от 0,13 до 3,7 мг%, средний показатель был равен 0,73 мг%. Наибольшее содержание хлорофиллов наблюдалось у образцов к-1912 (Вьетнам), к-1173 (Сомали), к-1738 (Россия) и к-713 (США). Один из этих образцов к-1912 имел светло-зеленый цвет семядолей, остальные – желтый. Сохранение зеленого цвета у семядолей имеет гораздо больший практический интерес, чем просто необычный внешний вид, вызванный длительным сохранением хлорофилла. Известно, что биосинтез и сохранение хлорофилла регулируются каротиноидами, которые способствуют утилизации активных форм кислорода, образующихся в процессе захвата фотонов хлорофиллами. Следовательно, можно ожидать, что длительное сохранение хлорофилла в семенах связано с длительным сохранением каротиноидов, включая  $\beta$ -каротин, то есть провитамина А, которые имеют значение для улучшения рациона питания (Sivasakthi et al., 2019). Например, в настоящее время уже установлено, что в зеленых семядолях нута содержание специфических А-провитаминогенных каротиноидов, а именно  $\beta$ -каротина, в два-три раза больше, чем в семенах с желтыми семядолями (Rezaei et al., 2019). Сорта гороха с зелеными семядолями содержат примерно в два раза больше каротиноидов ( $16-21$  мкг $\times$ г $^{-1}$ ), чем сорта с желтыми семядолями ( $7-12$  мкг $\times$ г $^{-1}$ ) (Ashokkumar et al.,

2014). В нашем опыте подтвердилась как взаимосвязь между содержанием хлорофиллов и  $\beta$ -каротина в семенах ( $r=0,95$ ), так и связь между количеством  $\beta$ -каротина и каротиноидов ( $r=0,80$ ), и эти показатели имели очень высокие коэффициенты корреляции. Отметим, что такая зависимость между признаками наблюдалась у семян как со светло-зелеными, так и с желтыми семядолями. Поэтому необходимы дополнительные исследования, чтобы определить в какой степени повышенные уровни каротиноидов и хлорофиллов связаны с зеленым цветом семядолей *V. unguiculata*.

В результате исследования нами были выявлены образцы с высоким содержанием белка: к-567 (Индия) 30,02 мг%; к-133 (Россия) 29,57 мг%; крахмала: к-1249 (США) 55,05%; к-337 (Мексика) 56,15%; антоцианов: к-1355 (Вьетнам) 404,4 мг%; к-1738 ‘Сибирский размер’ (Россия) 371,79 мг%. Наибольшие показатели каротиноидов,  $\beta$ -каротина, хлорофиллов *a* и *b* отмечены у к-1912 (Вьетнам) 0,32 мг%, 0,14 мг%, 3,66 мг%; к-1173 (Сомали) 0,38 мг%, 0,12 мг%, 2,93 мг%; к-713 (США) 0,71 мг%, 0,13 мг%, 2,07 мг% соответственно. По комплексу биохимических признаков, отвечающих за питательную ценность, выделились к-1738 ‘Сибирский размер’ с высоким содержанием антоцианов, достигающим 394,0 мг%, относительно высоким содержанием белка (26,82%) и крахмала (43,77%) и к-567 из Индии с большим количеством антоцианов, белка и крахмала: 249,1 мг%, 30,51% и 45,28% соответственно. Образец к-1442 (Нигерия) отличался хорошими показателями по содержанию белка (29,43%) и крахмала (48,29%), но имел низкое содержание антоцианов (4,0 мг%). Несмотря на рассчитанную нами отрицательную корреляцию между содержанием белка и крахмала в семенах *V. unguiculata* ( $r= -0,81$ ), тенденция, также выявленная в случае зерновок злаковых культур (Novikov, 2012), значения показателей у образца к-1442 (Нигерия) указывают на то, что в его семенах накапливается достаточное количество и белка, и крахмала, что свидетельствует о возможности селекции генотипов с высокими значениями параметров по обоим признакам.

## Заключение

Исследование питательной ценности образцов *Vigna unguiculata*, имеющих разный цвет семян и различное эколого-географическое происхождение, выявило прямую зависимость окраски семенной кожуры от содержания антоцианов. Достоверных связей между происхождением образцов и содержанием большинства исследованных биохимических признаков в семенах в нашей выборке обнаружено не было, за исключением количества каротиноидов, на которое влияло происхождение. Семена с черной окраской содержали значительно большее количество антоцианов, чем семена других цветов, вишневого и красно-коричневого, которые, несмотря на интенсивность окраски, имели низкие показатели по этому признаку. По-видимому, окраска семян данных

образцов обусловлена не только антоцианами, но и другими пигментами. Содержание  $\beta$ -каротина в семенах коррелировало с хлорофиллом и каротиноидами ( $r > 0,8$ ), а для содержания крахмала и белка выявлена отрицательная корреляция ( $r = -0,81$ ). Содержание этих соединений достоверно не связано ни с окраской семян, ни с происхождением образцов: их накопление связано с особенностями генотипа. Образцы, выделенные нами по высокому содержанию белка, крахмала, каротиноидов и хлорофиллов в семенах, можно использовать для производства продуктов питания и пищевых добавок богатыми питательными и биологически активными веществами, а также в качестве кормов для животных. Эти образцы будут востребованы и при селекции высокоценных пищевых и кормовых сортов *V. unguiculata*.

## References/Литература

- Arora S.K., Das B. Cowpea as potential crop for starch. *Starch-starke*. 1976;28(5):158-160. DOI: 10.1002/STAR.19760280503
- Ashokkumar K., Tar'an B., Diapari M., Arganosa G., Warkentin T.D. Effect of Cultivar and Environment on Carotenoid Profile of Pea and Chickpea. *Crop Science*. 2014;54:2225-2235. DOI: 10.2135/cropsci2013.12.0827
- Bai Z., Huang X., Meng J., Kan L., Nie S. A comparative study on nutritive peculiarities of 24 Chinese cowpea cultivars. *Food and Chemical Toxicology*. 2020;146:111841. DOI: 10.1016/j.fct.2020.111841
- Boukar O., Belko N., Chamarthi S., Togola A., Batieno J., Owusu E., Haruna M., Diallo S., Umar M., Olufajo O., Fatokun C. Cowpea (*Vigna unguiculata*): Genetics, Genomics and Breeding. *Plant Breeding*. 2019;138:415-424. DOI: 10.1111/pbr.12589
- Carvalho M., Carnide V., Sobreira C., Castro I., Coutinho J., Barros A., Rosa E. Cowpea immature pods and grains evaluation: an opportunity for different food sources. *Plants*. 2022;11:2079. DOI: 10.3390/plants11162079
- Chavan U.D., Momin A., Chavan J.K., Amarowicz R. Characteristics of starch from rice bean (*Vigna umbellata* L.) seeds – a short report. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*. 2009;59(1):25-27.
- Choi S.W., Kang J.E., Lee S.K., Ly S., Chung J.I. Breeding of Black Soybean with Green Cotyledon and Four Recessive Alleles for Lipoxigenase, Kunitz Trypsin Inhibitor, Lectin, and Stachyose. *Agronomy*. 2021;11:309. DOI: 10.3390/agronomy11020309
- Deepika D.D., Padhi S.R., Gore P.G., Tripathi K., Katral A., Chandora R., Abhishek G.J., Kondal V., Singh R., Bharadwaj R., Bhatt K., Rana J., Riar A. Nutritional potential of adzuki bean germplasm and mining nutri-dense accessions through multivariate analysis. *Foods*. 2023;12:4159. DOI: 10.3390/foods12224159
- Egorova G.P., Perchuk I.N., Solovyeva A.E., Buravtseva T.V. Sources of high protein content in common bean seeds (*Phaseolus vulgaris*) from the VIR collection. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2019;180(2):44-50. [in Russian] (Егорова Г.П., Перчук И.Н., Соловьева А.Е., Буравцева Т.В. Источники высокого содержания белка семян фасоли обыкновенной (*Phaseolus vulgaris*) из мировой коллекции ВИР. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2019;180(2):44-50). DOI: 10.30901/2227-8834-2019-2-44-50
- El-Qudah J.M. Estimation of carotenoid contents of selected Mediterranean legumes by HPLC. *World Journal of Medical Sciences*. 2014;10:89-93. DOI: 10.5829/idosi.wjms.2014.10.1.81202
- FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Food and agriculture data; 2024. Available from: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> [accessed Sept. 25, 2025].
- GOST 10845-98. Grain and its processed products. The method of starch determination. Moscow: Standartinform; 2009. [in Russian] (ГОСТ 10845-98. Зерно и продукты его переработки. Метод определения крахмала. Москва: Стандартинформ; 2009). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200023863> [дата обращения: 11.04.2025].
- GOST 10846-91. Grain and its processed products. The method of protein determination. Moscow: Standartinform; 2009. [in Russian] (ГОСТ 10846-91. Зерно и продукты его переработки. Метод определения белка. Москва: Стандартинформ; 2009). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200023864> [дата обращения: 11.04.2025].
- GOST 9404-88. Flour and bran. Method of moisture content determination. Moscow: Standartinform; 2007. [in Russian] (ГОСТ 9404-88. Мука и отруби. Метод определения влажности. Москва: Стандартинформ; 2007). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200022334> [дата обращения: 22.05.2025].
- Ha T.J., Lee M.H., Park C.H., Pae S.B., Shim K.B., Ko J.M., Shin S.O., Baek I.Y., Park K.Y. Identification and characterization of anthocyanins in yard-long beans (*Vigna unguiculata* ssp. *sesquipedalis* L.) by High-Performance Liquid Chromatography with diode array detection and electrospray ionization/mass spectrometry (HPLC-DAD-ESI/MS) analysis. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2010; 58(4):2571-2576. DOI: 10.1021/JF903883E
- Han K.-H., Kitano-Okada T., Seo J.-M., Kim S.-J., Sasaki K., Shimada K., Fukushima M. Characterisation of anthocyanins and proanthocyanidins of adzuki bean extracts and their antioxidant activity. *Journal of Functional Foods*. 2015;14:692-701. DOI: 10.1016/j.jff.2015.02.018
- Jo H., Lee J.Y., Cho H., Choi H.J., Son C.K., Bae J.S., Bilyeu K., Song J.T., Lee J.D. Genetic diversity of soybeans (*Glycine max* (L.) Merr.) with black seed coats and green cotyledons in Korean germplasm. *Agronomy*. 2021;11:581. DOI: 10.3390/agronomy11030581
- Krylova E.A., Mikhailova A.S., Zinchenko Y.N., Perchuk I.N., Razgonova M.P., Khlestkina E.K., Burlayaeva M.O. The content of anthocyanins in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) seeds and contribution of the MYB gene cluster to their coloration pattern. *Plants*. 2023;12(20):3624. DOI: 10.3390/plants12203624
- Kan L., Nie S., Hu J., Wang S., Bai Z., Wang J., Zhou Y., Jiang J., Zeng Q., Song K. Comparative study on the chemical composition, anthocyanins, tocopherols and carotenoids of selected legumes. *Food Chemistry*. 2018;260:317-326. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.03
- Luthria A., Singh K., D'Souza M. *In vitro* antioxidant activity of black gram, cowpea, desi chickpea and yellow mustards affected by sprouting. *Journal of Global Biosciences*. 2014;3(1):385-389. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/261996070\\_In\\_vitro\\_antioxidant\\_activity\\_of\\_black\\_gram\\_cowpea\\_desi\\_chickpea\\_and\\_yellow\\_mustard\\_as\\_affected\\_by\\_sprouting](https://www.researchgate.net/publication/261996070_In_vitro_antioxidant_activity_of_black_gram_cowpea_desi_chickpea_and_yellow_mustard_as_affected_by_sprouting) [accessed Sept. 13, 2025].
- Naiker T.S., Gerrano A.S., Mellem J.J. Physicochemical properties of flour produced from different cowpea (*Vigna unguiculata*) cultivars of Southern African origin. *Journal of Food Science and Technology*. 2019;56(3):1541-1550. DOI: 10.1007/S13197-019-03649-1
- Novikov N.N. Plant biochemistry (Биохимия растений). I.A. Frolova, A.S. Maksimova (eds). Moscow: KolosS; 2012. [in Russian] (Новиков Н.Н. Биохимия растений / под ред. И.А. Фроловой, А.С. Максимовой. Москва: КолосС; 2012).
- Ogorodnova U.A., Timofeeva O.A. A comprehensive practical course on plant physiology and biochemistry: a teaching aid (Bol'shoy praktikum po fiziologii i biokhimii rasteniy: uchebno-metodicheskoye posobiye). Kazan: Kazan University Publishing House; 2020. [in Russian] (Огороднова У.А., Тимофеева О.А. Большой практикум по физиологии и биохимии растений: учебно-методическое пособие. Казань: Издательство Казанского университета; 2020). URL: [https://kpfu.ru/portal/docs/F1945282971/Metodichka.Ogorodnovoj\\_Timofeevoj\\_1.2.pdf](https://kpfu.ru/portal/docs/F1945282971/Metodichka.Ogorodnovoj_Timofeevoj_1.2.pdf) [дата обращения: 25.09.2025].
- Ojwang L., Dykes L., Awika J. Ultra performance liquid chromatography–tandem quadrupole mass spectrometry profiling of anthocyanins and flavonols in cowpea (*Vigna unguiculata*) of varying genotypes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2012;60(14):3735-3744. DOI: 10.1021/JF2052948
- Oke D.B., Tewe O.O., Fetuga B.L. The nutrient composition of some

- cowpea varieties. *Nigerian Journal of Animal Production*. 2015;22(1):32-36. DOI: 10.51791/NJAP.V22I1.2024
- Orita A., Musou-Yahada A., Shoji T., Okiand T., Ohta H. Comparison of anthocyanins, proanthocyanidin oligomers and antioxidant capacity between cowpea and grain legumes with colored seed coat. *Food Science and Technology Research*. 2019;25(2):287-294. DOI: 10.3136/fstr.25.287
- Padhi S.R., Bartwal A., John R., Tripathi K., Gupta K., Wankhede D.P., Mishra G.P., Kumar S., Archak S., Bhardwaj R. Evaluation and multivariate analysis of cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp] germplasm for selected nutrients – mining for nutrient accessions. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2022;6:888041. DOI: 10.3389/fsufs.2022.888041
- Panova T.M., Shchegolev A.A. Technology and equipment for processing plant raw matter: (guidelines for laboratory practical training) (Технология и оборудование для переработки растительного сырья: (методические указания по выполнению лабораторного практикума)). Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University = Ural'skiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskii universitet; 2010. [in Russian] (Панова Т.М. Шегелев А.А. Технология и оборудование для переработки растительного сырья: (методические указания по выполнению лабораторного практикума). Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет; 2010). URL: [https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/41/3/Panova\\_T.M.%2c%20\\_SHegolev\\_A.A..pdf](https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/41/3/Panova_T.M.%2c%20_SHegolev_A.A..pdf) [дата обращения: 25.09.2025].
- Perchuk I., Shelenga T., Gurkina M., Miroshnichenko E., Burlyayeva M. Composition of primary and secondary metabolite compounds in seeds and pods of asparagus bean (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) from China. *Molecules*. 2020;25:3778. DOI: 10.3390/molecules25173778
- Rezaei M.K., Deokar A.A., Arganosa G., Roorkiwal M., Pandey S.K., Warkentin T.D., Varshney R.K., Taran B. Mapping quantitative trait loci for carotenoid concentration in three F<sub>2</sub> populations of chickpea. *Plant Genome*. 2019;12(3):190067. DOI: 10.3835/plantgenome2019.07.0067
- Second Ravelombola W., Shi A., Weng Y., Motes D., Chen P., Srivastava V., Wingfield C. Evaluation of total seed protein content in eleven Arkansas cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) lines. *American Journal of Plant Sciences*. 2016;7:2288-2296. DOI: 10.4236/ajps.2016.715201
- Shmidt V.M. Mathematical methods in botany (Matematicheskiye metody v botanike). Leningrad: Publishing house of Leningrad State University; 1984. [in Russian] (Шмидт В.М. Математические методы в ботанике. Ленинград: Изд-во ЛГУ; 1984).
- Sinegovskaya V.T., Ochкурова V.V., Sinegovskiy M.O. Contents of protein and fat in soybean seeds of various genetic origin. *Russian Agricultural Sciences*. 2020;5:15-19. [in Russian] (Синеговская В.Т., Очкурова В.В., Синеговский М.О. Содержание белка и жира в семенах сортов сои различного генетического происхождения. *Российская Сельскохозяйственная Наука*. 2020;5:15-19). DOI: 10.31857/S250026272005004X
- Sivasakthi K., Marques E., Kalungwana N., Carrasquilla-Garcia N., Chang P.L., Bergmann E.M., Bueno E., Cordeiro M., Sani S.G.A.S., Udupa S.M. Rather I.A., Rouf Mir R., Vadez V., Vandemark G.J., Gaur P.M., Cook D.R., Boesch C., von Wettberg E.J.B., Kholova J., Penmetza R.V. Functional dissection of the chickpea (*Cicer arietinum* L.) stay-green phenotype associated with molecular variation at an ortholog of Mendel's I gene for cotyledon color: implications for crop production and carotenoid biofortification. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019;20(22):5562. DOI: 10.3390/ijms20225562
- Sodedji K.A.F., Assogbadjo A.E., Lee B., Kim H.-Y. An integrated approach for biofortification of carotenoids in cowpea for human nutrition and health. *Plants*. 2024;13:412. DOI: 10.3390/plants13030412
- Sodedji K.A.F., Ryu D.H., Choi J.Y., Agbahoungba S., Assogbadjo A.E., N'guetta S.P.A., Jung J.H., Nho C.W., Kim H.Y. Genetic diversity and association analysis for carotenoid content among sprouts of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp). *International Journal of Molecular Sciences*. 2022;23(7):3696. DOI: 10.3390/ijms23073696
- StatSoft. Electronic manual on statistics (Elektronnyi uchebnyk po statistike). 1984-2021. [in Russian] (StatSoft. Электронный учебник по статистике. 1984-2021). URL: <http://statsoft.ru/home/textbook/default.htm> [дата обращения: 06.05.2025].
- Talekar S.M. Studies on chlorophyll changes in healthy and diseased leaf of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). *World Journal of Engineering Research and Technology*. 2022;8(5):272-275.
- Ubini A.R., Idegba C.M., Isaac I.E., Ilejeji A., Bozeinghien H. Seed protein content variation in cowpea genotypes. *African Journal of Plant Breeding*. 2016;3(1):142-147.
- Wang K., Huang M., Yang S., Li X., Gao Y., Yang P., Gao J., Gao X. Study on nutritional characteristics and antioxidant capacity of mung bean during germination. *Czech Journal of Food Sciences*. 2021;39(6):469-478. DOI: 10.17221/65/2021-CJFS
- Weather and climate: reference and information portal (Pogoda i klimat: spravочно-informatsionnyy portal). 2024. [in Russian] (Погода и климат: справочно-информационный портал. 2024). URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/> [дата обращения: 24.01.2025]
- Zhou B., Zheng B., Wu W. The ncRNAs involved in the regulation of abiotic stress-induced anthocyanin biosynthesis in plants. *Antioxidants*. 2024;13(1):55. DOI: 10.3390/antiox13010055
- Zhuzhukin V.I., Gorbunov V.S., Bagdalova A.Z. Variability of morphological features and biochemical composition of vigna seeds in the lower Volga region conditions. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2017;6:39-41. [in Russian] (Жужукин В.И., Горбунов В.С., Багдалова А.З. Изменчивость морфологических признаков и биохимического состава семян вигры в условиях нижнего Поволжья. *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2017;6:39-41).

### Информация об авторах

**Виталий Сергеевич Попов**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44, v.popov@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3274-7662>

**Артур Александрович Никифоров**, аспирант, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44, artur.nikiforov.2000@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-2859-0797>

**Эльвира Эмильевна Сафонова**, кандидат педагогических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44, e.safonova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2199-3115>

**Татьяна Васильевна Шеленга**, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44, tatanashelenga@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3992-5353>

**Екатерина Александровна Крылова**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44, e.krylova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4917-6862>

---

**Марина Олеговна Бурляева**, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44, m.burlyaeva@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3708-2594>

### ***Information about the authors***

**Vitaliy S. Popov**, Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 42, 44, Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190000 Russia, v.popov@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3274-7662>

**Artur A. Nikiforov**, graduate student, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 42, 44, Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190000 Russia, artur.nikiforov.2000@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-2859-0797>

**Elvira E. Safonova**, Cand. Sci. (Pedagogy), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 42, 44, Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190000 Russia, e.safonova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2199-3115>

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

**Ekaterina A. Krylova**, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 42, 44, Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190000 Russia, e.krylova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4917-6862>

**Marina O. Burlyaeva**, Cand. Sci. (Biology), Leading Specialist, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 42, 44, Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190000 Russia, m.burlyaeva@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3708-2594>

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

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

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 23.10.2025; одобрена после рецензирования 19.11.2025; принята к публикации 19.02.2026.

The article was submitted on 23.10.2025; approved after reviewing on 19.11.2025; accepted for publication on 19.02.2026.

Научная статья

УДК 632.4:631.523:633.111

DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-05



## Комплексная оценка устойчивости сортов яровой мягкой пшеницы татарстанской селекции к бурой ржавчине с использованием молекулярно-генетических и полевых методов

В. В. Костенко<sup>1</sup>, Н. Б. Баранова<sup>1</sup>, Д-р. Ф. Асхадуллин<sup>1,2</sup>,  
Д-л. Ф. Асхадуллин<sup>2</sup>, М. Л. Пономарева<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

<sup>2</sup> Казанский научный центр Российской академии наук, Татарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное структурное подразделение Казанского научного центра Российской академии наук (ТатНИИСХ ФИЦ КазНЦ РАН), Казань, Россия

**Автор, ответственный за переписку:** Костенко Виктория Викторовна, vvkostenko1@gmail.com

**Актуальность.** Бурая ржавчина *Puccinia triticina* Erik. мягкой пшеницы является одной из наиболее вредоносных болезней в условиях умеренного климата Российской Федерации, вызывая значительные потери урожая и снижение качества зерна. В связи с этим актуальной задачей является оценка устойчивости сортов и разнообразия *Lr*-генов у татарстанских сортов пшеницы. Наибольший интерес представляют гены *Lr9*, *Lr19*, *Lr24*, *Lr26*, *Lr34*, *Lr37/Yr17/Sr38* и *Lr46*, обеспечивающие устойчивость на различных стадиях развития растений. Целью исследования являлась комплексная оценка устойчивости к бурой ржавчине сортов яровой мягкой пшеницы татарстанской селекции с использованием полевых и молекулярно-генетических методов. **Материалы и методы.** Устойчивость 15 сортов оценивали в полевых условиях в 2023–2025 годах на экспериментальной базе Татарского НИИСХ ФИЦ КазНЦ РАН по степени поражения флагового и предфлагового листьев. Идентификацию генов устойчивости проводили с использованием диагностических ДНК-маркеров, ассоциированных с шестью *Lr*-генами. **Результаты и обсуждение.** Наиболее устойчивыми в полевых условиях оказались сорта ‘Наставник’, ‘Хазинэ’ и ‘Чистопольская’, характеризующиеся наличием комбинаций *Lr9+Lr24+Lr46*, *Lr19+Lr24* и *Lr9+Lr24+Lr34* соответственно. Средний уровень устойчивости (индекс устойчивости 0,4–0,6) в эпифитотийный год имели сорта ‘Аль Варис’, ‘Балкыш’, ‘Буяк’ и ‘Сакара’. Показано, что высокая и долговременная устойчивость формируется за счёт сочетания расоспецифичных и возрастных генов. Полученные данные указывают на различия в информативности и специфичности молекулярных маркеров, использованных для оценки устойчивости сортов. **Заключение.** Проявление устойчивости в полевых условиях определяется генетическим фоном сорта, агроклиматическими условиями и расовым составом возбудителя. Результаты исследования могут быть использованы для целенаправленного отбора исходного материала и реализации стратегии пирамидирования генов устойчивости в селекционных программах яровой пшеницы.

**Ключевые слова:** яровая мягкая пшеница, *Triticum aestivum* L., *Puccinia triticina*, *Lr*-гены, селекция на устойчивость, молекулярные маркеры, комбинации генов, Республика Татарстан

**Благодарности:** работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета «Приоритет-2030» тема № 125091510325-0 и в рамках государственного задания Минобрнауки России для ТатНИИСХ ФИЦ КазНЦ РАН тема № 125031003428-9

**Для цитирования:** Костенко В.В., Баранова Н.Б., Асхадуллин Д-р.Ф., Асхадуллин Д-л.Ф., Пономарева М.Л. Комплексная оценка устойчивости сортов яровой мягкой пшеницы татарстанской селекции к бурой ржавчине с использованием молекулярно-генетических и полевых методов. *Биотехнология и селекция растений*. 2026;9(1):18–28. DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-05

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.

© Костенко В.В., Баранова Н.Б., Асхадуллин Д-р.Ф., Асхадуллин Д-л.Ф., Пономарева М.Л., 2026

Original article

DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-o5

## Comprehensive evaluation of brown rust resistance in Tatarstan spring bread wheat cultivars using molecular genetics and field methods

Victoria V. Kostenko<sup>1</sup>, Natalia B. Baranova<sup>1</sup>, Damir F. Askhadullin<sup>1,2</sup>,  
Danil F. Askhadullin<sup>2</sup>, Mira L. Ponomareva<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

<sup>2</sup>Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Tatar Research Institute of Agriculture – Subdivision of the Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia

**Corresponding author:** Victoria V. Kostenko, vvkostenko1@gmail.com

**Background.** Brown rust of bread wheat caused by *Puccinia triticina* Eriks. is one of the most harmful diseases in the temperate climate of the Russian Federation, causing significant crop losses and reducing grain quality. In this regard, an urgent task is to assess the resistance of wheat cultivars and the diversity of *Lr* genes in Tatarstan. Of greatest interest are the genes *Lr9*, *Lr19*, *Lr24*, *Lr26*, *Lr34*, *Lr37/Yr17/Sr38* and *Lr46*, which provide resistance at various stages of plant development. The aim of the study was to comprehensively assess the brown rust resistance in spring bread wheat cultivars bred in Tatarstan using field and molecular genetic methods. **Materials and methods.** The resistance of 15 cultivars of bread wheat *Triticum aestivum* L. was assessed in 2023-2025 by the degree of damage to the flag and pre-flag leaves in field conditions at the experiment base of the Tatar Scientific Research Institute of Agriculture of the Kazan Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences. Resistance genes were identified using diagnostic DNA markers associated with six *Lr* genes. **Results and discussion.** The most resistant cultivars in field conditions were ‘Nastavnik’, ‘Khazine’ and ‘Chistopol’skaya’ characterized by the presence of combinations *Lr9+Lr24+Lr46*, *Lr19+Lr24* and *Lr9+Lr24+Lr34*, respectively. The cultivars ‘Al’ Varis’, ‘Balkysh’, ‘Bulyak’ and ‘Sakara’ had an average level of resistance (resistance index 0.4-0.6) in the epiphytotic year. It has been shown that high and long-term resistance is formed due to a combination of race-specific and age-related genes. The data obtained indicate differences in the informativeness and specificity of molecular markers used to assess the resistance of cultivars. **Conclusions.** The manifestation of resistance in field conditions is determined by the genetic background of the cultivars, agroclimatic conditions and the race composition of the pathogen. The results of the study can be used for the targeted selection of source material and the implementation of a strategy for pyramiding resistance genes in spring wheat breeding programs.

**Keywords:** spring bread wheat *Triticum aestivum* L., *Puccinia triticina*, *Lr*-genes, breeding for resistance, molecular markers, gene combinations, Republic of Tatarstan

**Acknowledgements:** the research was carried out using the funds of the Strategic Academic Leadership Program “Priority 2030” of the Kazan Federal University of the Government of the Russian Federation project No. 125091510325-0 and as part of the State Assignment of the Ministry of Education and Science of Russia to the Tatar Research Institute of Agriculture, Federal Research Center of the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences project No. 125031003428-9.

**For citation:** Kostenko V.V., Baranova N.B., Askhadullin D-r.F., Askhadullin D-l.F., Ponomareva M.L. Comprehensive evaluation of brown rust resistance in Tatarstan spring bread wheat cultivars using molecular genetics and field methods. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2026;9(1):18-28. (In Russ.). DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-o5

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

© Kostenko V.V., Baranova N.B., Askhadullin D-r.F., Askhadullin D-l.F., Ponomareva M.L., 2026

## Введение

Буряя (листовая) ржавчина, вызываемая возбудителем *Puccinia triticina* Eriks., является одним из наиболее широко распространённых и экономически значимых заболеваний мягкой пшеницы *Triticum aestivum* L., особенно в регионах с умеренным климатом (Askhadullin et al., 2023). Высокая вредоносность болезни обусловлена исключительной адаптивной пластичностью популяций патогена, их способностью к быстрой эволюции и преодолению устойчивости новых сортов (Koláriková et al., 2023).

В условиях постоянной изменчивости возбудителя обеспечение устойчивости пшеницы к бурой ржавчине остаётся одной из приоритетных задач современных селекционных программ. В годы, благоприятные для развития заболевания, потери урожая могут достигать 40-50% (Riaz, Wong, 2017; Singh et al., 2016), особенно в регионах с высокой плотностью возбудителя (Shishkin et al., 2018).

Наибольшая интенсивность эпифитотий бурой ржавчины наблюдается в ключевых зернопроизводящих регионах Российской Федерации, таких как Поволжье, Северный Кавказ и Центрально-Чернозёмный регион (Kiseleva et al., 2016; Zhogaleva et al., 2022). В условиях Поволжья заболевание регистрируется практически ежегодно, при этом эпифитотии фиксируются в среднем шесть раз за десятилетие (Gulyaeva et al., 2020).

Наиболее экологически безопасным и экономически оправданным методом борьбы с бурой ржавчиной является создание и возделывание сортов, обладающих генетически детерминированной устойчивостью (Xu et al., 2024). При выведении таких сортов требуется идентификация и валидация генов устойчивости. Применение молекулярно-генетических методов позволяет эффективно планировать гибридизацию, минимизировать дублирование аллелей устойчивости в родительских компонентах, а также проводить пирамидирование (комбинирование) нескольких генов, не всегда эффективных по отдельности (Mohan et al., 2025). Такой подход способствует стабилизации урожайности и снижению зависимости от применения фунгицидов (Omara et al., 2021).

На сегодняшний день известно и официально каталогизировано 83 гена устойчивости к бурой ржавчине пшеницы (*Lr* – *Leaf rust*) (Kolmer et al., 2023), причём почти половина из них интрогрессирована от диких сородичей культурной пшеницы: *Aegilops* L., *Thinopyrum* L., *Secale* L., *Triticum timopheevii* Zhuk., *Triticum dicoccoides* (Koern. ex Aschers. et Graebn) Schweinf. (Prasad et al., 2020). Однако в условиях производственных посевов эффективность многих из этих генов со временем снижается вследствие высокой генетической изменчивости патогена (Gulyaeva et al., 2023).

Наибольший интерес среди генов устойчивости представляют *Lr9*, *Lr19*, *Lr24*, *Lr26*, *Lr34*, комплекс *Lr37/Yr17/Sr38* и *Lr46*, так как они обеспечивают устойчивость как

на стадии проростков, так и на стадии взрослого растения. Например, ген *Lr9*, интрогрессированный от *Aegilops umbellulata* Zhuk. ранее обеспечивал высокую устойчивость против широкого спектра патотипов гриба, однако из-за появления новых рас патогена его эффективность резко снизилась (Volkova et al., 2022). Ген *Lr19* сцеплен с геном устойчивости к стеблевой ржавчине *Sr25* и локализован в транслокации от *Thinopyrum ponticum* (Podp.) Barkworth & D.R. Dewey. Ген *Lr26*, связанный с сегментом генома ржи *Secale cereale* L., нередко выявляется в сортах с комплексной устойчивостью (Mourad et al., 2022). Гены *Lr34* и *Lr46* обеспечивают горизонтальный тип устойчивости, проявляющийся в замедленном развитии болезни, что способствует более длительной защите растений. Комплекс генов *Lr37/Yr17/Sr38*, интрогрессированный от *Aegilops ventricosa* Tausch, обеспечивает устойчивость одновременно к трём видам ржавчины.

Надёжная идентификация генов устойчивости в сортах и селекционных линиях является ключевым этапом для ускорения отбора перспективного исходного материала. Несмотря на сохраняющуюся значимость полевых фитопатологических методов оценки, их результаты во многом зависят от абиотических факторов и расового состава патогена. В этой связи молекулярные маркеры, специфичные к определённым генам устойчивости, становятся незаменимыми инструментами современной селекции (Raghunandan et al., 2022). Их применение позволяет выявлять наличие целевых аллелей без необходимости искусственного заражения растений. Совмещение молекулярной диагностики с агрономической и фитопатологической оценкой существенно повышает эффективность селекционного процесса и ускоряет создание новых сортов, устойчивых к бурой ржавчине, что особенно актуально в условиях глобального изменения климата и расширения ареала патогенов.

Цель исследования – молекулярная идентификация генов устойчивости к бурой ржавчине *Lr9*, *Lr19*, *Lr24*, *Lr26*, *Lr34*, *Lr37/Yr17/Sr38*, *Lr46* у сортов мягкой яровой пшеницы татарстанской селекции с использованием диагностических ДНК-маркеров, а также оценка уровня устойчивости взрослых растений в условиях полевых испытаний.

## Материалы и методы

В период 2023-2025 годов на экспериментальной базе ФИЦ КазНЦ РАН, расположенной в 15 км к юго-востоку от города Казань в агроклиматическом районе Предкамье Республики Татарстан, был проведен полевой скрининг сортов пшеницы на устойчивость к бурой ржавчине, возбудителем которой является грибок *Puccinia triticina* Erikss. (= *P. recondita*) Rob. ex Desm f. *sp. tritici* Eriks. et Henn. Опытный участок характеризовался серыми лесными, тяжелосуглинистыми почвами с высокой степенью окультуренности и слабокислой реакцией почвенного раствора, а также повышенным или высоким содержанием

основных элементов питания. Экспериментальные делянки площадью 10 м<sup>2</sup> были заложены в трехкратной повторности методом систематического размещения со смещением. Посев семян исследуемых сортов проводили рядовым способом в оптимальные агротехнические сроки, а именно в первой половине мая. Агротехнический уход за посевами включал гербицидную обработку против двудольных и злаковых сорняков в период кущения-начала выхода в трубку в соответствии с рекомендациями производителей.

Оценка устойчивости сортов в полевых условиях осуществлялась в питомнике экологического сортоиспытания на естественном инфекционном фоне. В исследовании были использованы 15 сортов яровой мягкой пшеницы селекции ФИЦ КазНЦ РАН, а в качестве восприимчивого контроля был использован сорт 'Ситара'. Степень поражения бурой ржавчиной флагового и предфлагового листьев оценивали в процентах по шкале (Peterson et al., 1948) с использованием методических рекомендаций ВНИИ фитопатологии (Sanin et al., 2008) Данная шкала предусматривает градацию устойчивости от 9 (очень высокая устойчивость, отсутствие признаков поражения) до 7 (устойчивость, поражение до 10%), и восприимчивости от 4-3 (восприимчивость, поражение до 40-65%) до 2-1 (высокая и очень высокая восприимчивость, поражение до 90-100%).

Расчет площади под кривой развития бурой ржавчины (ПКРБ) проводили согласно методическим рекомендациям по созданию инфекционных фонов для иммунологических исследований пшеницы (Sanin et al., 2008):

$$S = \frac{(a + b)t_1 + (b + c)t_2 + (c + d)t_3}{2}$$

где S – площадь под кривой развития болезни в условных единицах;

a, b, c, d – степень развития болезни при 1, 2, 3-м учетах, %; t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub>, t<sub>3</sub> – количество дней между предыдущим и последующим учетом.

Для классификации сортов по уровню неспецифической устойчивости использовали индекс устойчивости (ИУ), который вычисляли как отношение площади под кривой развития болезни (S) исследуемого сорта к аналогичному показателю восприимчивого контроля 'Ситара'. ИУ сорта условно дифференцировали на четыре группы: 0,10-0,35 – высокий уровень устойчивости; 0,36-0,65 – средний; 0,66-0,80 – низкий; более 0,81 – восприимчивость (Makarov et al., 1991).

Для анализа метеорологических условий в ходе исследования были использованы данные, полученные с автоматической метеостанции «Сокол-1М», которая находится в непосредственной близости от опытных участков.

Гидротермический коэффициент (ГТК), рассчитанный по формуле Селянинова (Selyaninov, 1928), использовали для оценки степени увлажнения: ГТК≥1,0 интерпретировали как достаточное увлажнение, ГТК≤0,9 – как умеренное, а ГТК≤0,7 – как засушливость.

Погодные условия в период вегетации яровой пшеницы в годы исследования были различными. 2023 и 2024 годы в целом соответствовали среднемноголетним показателям по количеству выпадающих осадков и температурному режиму. Однако 2025 год отличился существенными отклонениями от среднемноголетних значений (Приложение 1/ Supplement 1<sup>1</sup>). В мае и июне 2025 года наблюдалось избыточное увлажнение: в мае выпало 93 мм осадков при норме 36 мм, что привело к расчетному ГТК=2,04, указывающему на условия переувлажнения. Аналогичная ситуация сложилась в июне, когда выпало 102 мм осадков, а ГТК составил 1,86, также свидетельствуя о переувлажнении. Эти влажные условия, в сочетании с температурой около 20°C, которая является оптимальной для роста и развития возбудителя бурой ржавчины (Roelfs et al., 1992), создали благоприятную среду для эпифитотийного развития заболевания. В июле же, несмотря на среднесуточную температуру, близкую к среднемноголетним значениям (20,7°C), был зафиксирован ГТК=0,58, что указывает на условия недостатка влаги.

ДНК выделяли из листьев 7-дневных растений с помощью коммерческого набора diaGene для выделения ДНК из растительных тканей на спин-колонках («diaGene», Россия) согласно протоколу фирмы-изготовителя. Для амплификации маркерных последовательностей, ассоциированных с генами устойчивости к бурой ржавчине, использовали праймеры, синтезированные в «Евроген» (Москва, Россия), на основе соответствующих нуклеотидных последовательностей. Полимеразную цепную реакцию (ПЦР) проводили в объеме 25 мкл в микроцентрифужных пробирках на программируемом амплификаторе «Терцик» («ДНК-технология», Россия). Реакционная смесь включала следующие компоненты: 100 мМ трис-НСl (рН 8,7), 50 мМ КСl, 2-3 мМ MgCl<sub>2</sub>, 0,2 мМ дНТФ, 1 ед. Taq-полимеразы, 0,02 нг каждого праймера и исследуемую ДНК. Полученные фрагменты ДНК разделяли с помощью электрофореза в агарозном геле («Диаэм», Россия) при напряженности электрического поля 5-10 В/см. Буферная система (1×ТАЕ) включала 40 мМ трис-ацетата (рН 8,0), 2 мМ ацетат натрия; 291 мМ ЭДТА-Na. ДНК регистрировали по люминесценции dsGreen (10 мг/мл; «Биолабмикс», Россия) в ультрафиолетовом свете при длине волны 312 нм. Результаты визуализировали с помощью системы гель-документации ChemiDocXRS+ (BIO-RAD, США). Нуклеотидные последовательности праймеров представлены в Приложении 2/ Supplement 2.

<sup>1</sup> Приложения доступны в онлайн версии статьи/ The supplements are available in the online version of the paper: DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-05

## Результаты и обсуждение

С середины 90-х годов XX века традиционные фитопатологические методы выявления генов устойчивости были дополнены молекулярно-генетическими подходами, что позволило значительно ускорить первичный скрининг и выявление генов *Lr* как индивидуально, так и в различных сочетаниях. Использование ДНК-маркеров особенно важно при идентификации частично эффективных и трудно определяемых сочетаний генов, оценка которых фитопатологическими методами затруднена из-за отсутствия в популяции патогена соответствующих вирулентных рас. Однако, несмотря на наличие маркеров для большинства известных генов *Lr*, только ограниченное число из них признано диагностическими и рекомендовано для использования в маркер-опосредованной селекции.

В годы изучения наблюдаемая интенсивность развития бурой ржавчины была различной. В 2023 году первые видимые проявления болезни в виде пустул бурой ржавчины были зафиксированы на пшенице 11 июля в фазу

налива зерна. Через шесть дней, при первой фитопатологической оценке посевов, максимальное распространение заболевания отмечалось у сорта 'Хаят': 20% листовой поверхности согласно шкале Петерсона. В последующий период интенсивность поражения возрастала незначительно, достигая 60% к фазе восковой спелости у восприимчивого сорта 'Ситара' (табл. 1).

В 2024 году первые пустулы бурой ржавчины появились 1 июля в период колошения. Инфекция на листьях развивалась медленно и достигла пика на развитых подгонах, находящихся в фазе восковой спелости. В этот период был проведен второй учет заболевания, при котором степень поражения листьев не превышала 30%.

В 2025 году наблюдалось повсеместное поражение пшеницы, достигавшее 100%, что свидетельствовало об эпифитотии. В таких условиях лишь сорт 'Хазинэ' продемонстрировал устойчивость, сохранив поражение на уровне 10%. К группе слабовосприимчивых были отнесены сорта 'Наставник' и 'Чистопольская' с поражением 20% и 30% соответственно.

**Таблица 1. Степень поражения сортов яровой пшеницы бурой ржавчиной в 2023-2025 годы**

**Table 1. The extent of damage to spring wheat cultivars by brown rust in 2023-2025**

Сорт/ Cultivar	Степень поражения, %/ The extent of damage, %						
	2023		2024		2025		
	17 июля/ Jul. 17	26 июля/ Jul. 26	16 июля/ Jul. 16	1 августа/ Aug. 1	16 июля/ Jul. 16	21 июля/ Jul. 21	6 августа/ Aug. 6
'Аль Варис'/ 'Al' Varis'	10	10	20	20	15	20	80
'Амир'/ 'Amir'	1	15	20	-	50	80	100
'Балкыш'/ 'Balkysh'	0	5	0	10	0	20	90
'Баракат' / 'Barakat'	1	5	5	10	10	80	100
'Буляк'/ 'Bulyak'	0	0	5	5	5	30	40
'Иделле'/ 'Idelle'	0	0	10	10	20	80	100
'Йолдыз'/ 'Ioldyz'	0	0	5	30	20	50	80
'Казанская юбилейная'/ 'Kazanskaya Yubileinaya'	5	10	5	20	20	40	80
'Надира'/ 'Nadira'	5	20	10	20	20	70	90
'Наставник'/ 'Nastavnik'	0	0	0	0	0	0	20
'Сакара'/ 'Sakara'	0	1	5	20	0	1	80
'Ситара'/ 'Sitara'	10	60	10	30	30	60	100
'Хазинэ'/ 'Khazine'	0	0	0	1	1	1	10
'Хаят'/ 'Khayat'	20	20	20	20	20	60	90
'Чистопольская'/ 'Chistopol'skaya'	0	0	0	5	0	1	30

Однократная полевая оценка в период максимального поражения не позволяет в полной мере оценить устойчивость сорта к заболеванию, поскольку не отражает динамику развития инфекции во времени. Пролонгированная стабилизация поражения на определенном уровне может свидетельствовать о проявлении горизонтального типа устойчивости. Для более точного отражения интенсивности и продолжительности поражения образцов рас-

считана площадь под кривой развития болезни (S). Наибольшая площадь под кривой была характерна для сорта 'Амир', у которого инфекция развивалась стремительно и достигала высоких значений. Наряду с ним высокими значениями этого параметра выделялись также сорта 'Баракат', 'Иделле', 'Надира' и 'Ситара'. Наименьшая площадь под кривой наблюдалась у сорта 'Хазинэ': S=93 (табл. 2).

**Таблица 2. Результаты полевой оценки поражения бурой ржавчиной сортов яровой мягкой пшеницы в 2025 году (эпифитотия)**

**Table 2. Results of field evaluation of leaf damage by brown rust in spring bread wheat cultivars in 2025 (epiphytotic)**

Сорт/ Cultivar	S <sup>1</sup>	ИУ/RI <sup>2</sup>	Уровень устойчивости/ The level of resistance
‘Аль Варис’/ ‘Al’ Varis’	888	0,59	средний/ middle
‘Амир’/ ‘Amir’	1765	1,17	восприимчивый/ susceptible
‘Балкыш’/ ‘Balkysh’	930	0,62	средний/ middle
‘Баракат’/ ‘Barakat’	1665	1,19	восприимчивый/ susceptible
‘Буляк’/ ‘Bulyak’	648	0,43	средний/ middle
‘Иделле’/ ‘Idelle’	1690	1,12	восприимчивый/ susceptible
‘Йолдыз’/ ‘Ioldyz’	1215	0,81	восприимчивый/ susceptible
‘Казанская юбилейная’/ ‘Kazanskaya yubileynaya’	1110	0,74	низкий/ low
‘Надира’/ ‘Nadira’	1505	1,00	восприимчивый/ susceptible
‘Наставник’/ ‘Nastavnik’	160	0,11	высокий/ high
‘Сакара’/ ‘Sakara’	651	0,43	средний/ middle
‘Ситара’/ ‘Sitara’	1505	1,00	восприимчивый/ susceptible
‘Хазинэ’/ ‘Khazine’	93	0,06	высокий/ high
‘Хаят’/ ‘Hayat’	1400	0,93	восприимчивый/ susceptible
‘Чистопольская’/ ‘Chistopol’skaya’	251	0,17	высокий/ high

Примечания: <sup>1</sup>S – площадь под кривой развития бурой ржавчины; <sup>2</sup>ИУ – индекс устойчивости сорта/ Notes: <sup>1</sup>S – the area under the brown rust development curve/ <sup>2</sup>RI – the resistance index of the cultivar

Индекс устойчивости (ИУ) характеризует сорт по степени устойчивости относительно восприимчивого стандарта. Сорта ‘Наставник’ (0,11), ‘Хазинэ’ (0,06) и ‘Чистопольская’ (0,17) характеризуются высоким уровнем устойчивости к бурой ржавчине. Средний уровень устойчивости (ИУ=0,4-0,6) в эпифитотийный год имели образцы: ‘Аль Варис’, ‘Балкыш’, ‘Буляк’ и ‘Сакара’, семь изученных образцов из 15 имели низкий уровень устойчивости.

С использованием шести ДНК-маркеров был проведен скрининг сортов на наличие генов устойчивости к бурой ржавчине. Молекулярно-генетическое исследование на наличие *Lr*-генов устойчивости в исследуемых образцах представлено на электрофореграммах (Приложение 3/Supplement 3) и в таблице 3.

В настоящем исследовании проведена комплексная оценка устойчивости к бурой ржавчине 15 сортов яровой мягкой пшеницы татарстанской селекции в полевых условиях, а также идентификация шести *Lr*-генов с использованием молекулярных маркеров.

**Идентификация гена *Lr9*.** Для идентификации использовали STS маркер SCS5-550, дающий при амплификации фрагмент ДНК размером 550 пн. Согласно полученным данным (см. табл. 3, см. Приложение 3/ Supplement 3) данный маркер был выявлен у 11 из 15 анализируемых сортов мягкой яровой пшеницы: ‘Амир’, ‘Балкыш’, ‘Баракат’, ‘Буляк’, ‘Иделле’, ‘Йолдыз’, ‘Казанская юбилейная’, ‘Наставник’, ‘Ситара’, ‘Хаят’ и ‘Чистопольская’.

польская’.

**Идентификация гена *Lr19*.** Мягкая пшеница получила транслокацию от *Agropiron elongatum* (Host) Beauvois с геном *Lr19*, расположенным на хромосоме 7DL. Эта транслокация также ассоциирована с желтой окраской эндосперма (Zhang, Dubcovsky, 2008). Для выявления гена *Lr19* был использован молекулярный маркер SCS265. Ген *Lr19* относится к числу наиболее распространенных в российских генотипах (Gulyaeva et al., 2018). При амплификации ДНК с праймерами для этого маркера происходит синтез фрагмента ДНК длиной 512 пн. Данный маркер был обнаружен в генотипе только одного сорта, ‘Хазинэ’, который также отличается повышенным содержанием каротиноидов в зерне.

**Идентификация гена *Lr24*.** Для идентификации гена *Lr24* мы использовали ДНК-маркер J09, для которого специфичен фрагмент длиной 310 пн. В результате анализа данный фрагмент обнаруживается практически у всех исследуемых сортов, кроме ‘Иделле’ и ‘Казанская Юбилейная’.

Устойчивость к ржавчине, не зависящая от рас, часто включает в себя гены “slow rusting” (Caldwell, 1968), которые связаны с более длительным латентным периодом, увеличением времени между заражением и споруляцией, производством меньшего количества урединий, характеризующихся меньшими размерами (Kadkhodaei et al., 2012). *Lr34* и *Lr46*, согласно данным литературы, в настоящее время являются важными и наиболее широко

**Таблица 3. Результаты ПЦР-анализа наличия или отсутствия маркеров устойчивости к бурой ржавчине у сортов яровой мягкой пшеницы**

**Table 3. PCR results regarding the presence/ absence of markers of resistance to leaf rust in spring bread wheat cultivars**

Сорт пшеницы/ Cultivar	Регионы допуска/ Regions of admission <sup>1</sup>	Выявленные маркеры устойчивости пшеницы к бурой ржавчине/ Identified markers of wheat resistance to leaf rust					
		SCS5-550 <i>Lr9</i> 550 пн	SCS265 <i>Lr19</i> 512 пн	J09 <i>Lr24</i> 310 пн	csLv34 <i>Lr34</i> 150/249 пн	WMC44 <i>Lr46</i> 242 пн	Ventriup/LN2 <i>Yr17/Lr37/Sr38</i> 262 пн
‘Аль Варис’/ ‘Al’ Varis’	7	–	–	+	– (249)	–	–
‘Амир’/‘Amir’	2, 4	+	–	+	+(150/249)	–	–
‘Балкыш’/ ‘Balkysh’	7	+	–	+	– (249)	+	–
‘Баракат’/ ‘Barakat’	–	+	–	+	– (249)	–	–
‘Буляк’/‘Bulyak’	9	+	–	+	– (249)	–	–
‘Иделле’/‘Idelle’	7	+	–	–	– (249)	–	–
‘Йолдыз’/ ‘Ioldyz’	4, 5, 7	+	–	+	– (249)	+	–
‘Казанская юбилейная’/ ‘Kazanskaya yubileinaya’	7	+	–	–	+(150)	+	–
‘Надира’/ ‘Nadira’	4, 7, 9	–	–	+	– (249)	+	–
‘Наставник’/ ‘Nastavnik’	–	+	–	+	– (249)	+	–
‘Сакара’/‘Sakara’	–	–	–	+	+(150/249)	+	–
‘Ситара’/‘Sitara’	4, 7	+	–	+	– (249)	–	–
‘Хазинэ’/ ‘Khazine’	9	–	+	+	– (249)	–	–
‘Хаят’/‘Hayat’	7	+	–	+	+(150/249)	+	–
‘Чистопольская’/ ‘Chistopol’skaya’	–	+	–	+	+(150)	–	–

изученными генами “slow rusting” (Yan et al., 2021).

**Для идентификации гена *Lr34*** нами был использован STS-маркер csLV34, дающий при амплификации фрагменты размером 150 пн и 249 пн (Lagudah et al., 2006). Фрагмент размером 150 пн, ассоциированный с доминантным аллелем, был выявлен у пяти сортов: ‘Амир’, ‘Сакара’, ‘Хаят’, ‘Казанская Юбилейная’ и ‘Чистопольская’. Последние два сорта являются гомозиготами по доминантному аллелю. Ген устойчивости к бурой ржавчине *Lr34* (Samborski, Dыck, 1982), ранее *LrT2*, обеспечивает устойчивость взрослых растений (от англ. Adult Plant Resistance, APR), эффективность которой зависит от генетического фона и условий роста (Lagudah et al., 2006).

**Идентификация гена *Lr46*.** Наличие гена *Lr46*, обеспечивающего резистентность к бурой ржавчине, определяли с использованием молекулярного маркера WMC44, который при амплификации даёт фрагмент размером 242 пн и обнаруживается в генотипе семи сортов: ‘Бал-

кыш’, ‘Йолдыз’, ‘Казанская Юбилейная’, ‘Надира’, ‘Наставник’, ‘Сакара’ и ‘Хаят’. Ген *Lr46* обеспечивает многофакторную устойчивость: к желтой ржавчине *Yr29*, стеблевой ржавчине *Sr58*, мучнистой росе *Pm39*.

**Идентификация гена *Lr37*.** Для идентификации гена *Lr37* использовали SCAR маркер VENTRIUP-LN2, представляющий собой транслокацию 2NS/2AS. Она внесена в геном пшеницы от дикорастущего сородича *Aegilops ventricosa* Tausch и содержит гены *Lr37*, *Yr17* и *Sr38*, которые детерминируют устойчивость пшеницы на уровне проростков к бурой, желтой и стеблевой ржавчинам (Agarwal et al., 2021; Skolotneva et al., 2021). Наличие гена *Lr37* в генотипе обусловлено доминантной аллелью *Ventriup/LN2*, дающей при амплификации фрагмент размером 262 пн. В наших исследованиях маркер, тесно сцепленный с геном *Lr37*, отсутствовал у всех изученных сортов.

Согласно полученным данным, 70% изученных сортов татарстанской селекции несут ген *Lr9*, признан-

ный одним из наиболее эффективных генов устойчивости в мировой практике (Gulyaeva et al., 2009). Однако его эффективность в последние годы снизилась из-за массового распространения вирулентных рас *Puccinia triticina*, что согласуется с данными И.Н. Леоновой с соавторами (Leonova et al., 2020), отметившими утрату защитного эффекта *Lr9* и *Lr26* в российских сортах. Это подтверждается высокой восприимчивостью сорта 'Иделле', содержащего только *Lr9*. Использование этого гена в комбинации, например, с *Lr24*, позволяет повысить уровень устойчивости создаваемых сортов (Roelfs et al., 1992). Отсутствие дифференциации сортов по наличию гена *Lr9* позволяет предположить, что использованные молекулярные маркеры обладают недостаточной информативностью. Для уточнения выявленного феномена планируется проведение дополнительных исследований с применением альтернативных маркеров, в частности J13 (Leonova et al., 2020; Zhang et al., 2022).

Согласно данным Гульятеевой и Шайдаюк (Gulyaeva, Shaydayuk, 2021), российские сорта мягкой пшеницы характеризуются наличием как высокоэффективных генов *Lr24*, *Lr25*, *Lr28*, *Lr29*, *Lr41*, *Lr47*, *Lr66*, так и частично эффективных *Lr9*, *Lr19* и генов устойчивости взрослых растений *Lr21*, *Lr34*, *Lr35*, *Lr37*. Наши результаты согласуются с этими наблюдениями: большинство татарстанских сортов содержат комбинации из *Lr9*, *Lr19*, *Lr24* и *Lr34*, однако устойчивость в полевых условиях существенно различается.

Устойчивость, обеспечиваемая сочетанием расоспецифичных и неспецифичных (возрастных) генов, признана наиболее надёжной и долговечной формой защиты пшеницы (Prasad et al., 2020; Kiseleva et al., 2016). К числу таких APR-генов относят *Lr34*, *Lr46*, *Lr67* и *Lr68*, проявляющих эффективность на поздних стадиях онтогенеза независимо от расового состава патогена (Liu et al., 2021). Эти гены обеспечивают долговременную «slow rusting» устойчивость в полевых условиях.

Важной стратегией современной селекции является пирамидирование генов *Lr* – объединение в одном генотипе нескольких генов, контролирующих один и тот же признак и усиливающих действие друг друга (Leonova et al., 2020). Комбинации *Lr34+Lr46* или *Lr34+Lr67* рассматриваются как наиболее надежные, обеспечивающие долговременную устойчивость в полевых условиях (Dakouri et al., 2013; McCallum et al., 2016; Vokore et al., 2022). Результаты, полученные нами, демонстрируют различную эффективность одинаковых генетических комбинаций генов *Lr*: сорта 'Амир', 'Баракат' и 'Ситара', имеющие комбинацию генов *Lr9+Lr24*, проявили высокую восприимчивость к бурой ржавчине, что указывает на частичное преодоление действия этих генов местными расами патогена. В то же время сорт 'Чистопольская', несущий комбинацию генов *Lr9+Lr24+Lr34*, демонстрировал устойчивость к бурой ржавчине в полевых условиях. В исследовании О.А. Барановой с соавторами (Baranova et al., 2023) у данного сорта был идентифици-

рован ген *Sr57/Lr34*. В той же работе молекулярное тестирование на наличие гена устойчивости к бурой ржавчине *Lr24*, тесно сцепленного с геном устойчивости к стеблевой ржавчине *Sr24*, дало отрицательные результаты у всех изученных сортов, за исключением одного. Аналогичные данные приводятся в другом исследовании (Вагер, 2020). В связи с этим можно предположить, что использование в нашем исследовании маркера J09/1 для гена *Lr24* может приводить к ложноположительным результатам и, следовательно, маркер не может быть рекомендован для надёжной идентификации гена *Lr24* в практике маркер-опосредованной селекции. Для идентификации этого гена в сортах российской селекции Е.И. Гульятеева с соавторами (Gulyaeva et al., 2019) предлагают для гена *Lr24/Sr24* использовать два маркера: *Sr24#12* и *Sr24#50*.

Наиболее устойчивыми среди изученных оказались сорта 'Наставник', 'Хазинэ' и 'Чистопольская'. У сорта 'Наставник' выявлено присутствие трёх генов: *Lr9+Lr24+Lr46*, что подтверждает закономерность повышения устойчивости при пирамидировании APR-генов. Высокая устойчивость сорта 'Наставник' (ИУ=0,11) полностью согласуется с результатами, полученными с использованием молекулярных маркеров. Сорт 'Хазинэ' также демонстрирует высокую устойчивость в полевых условиях (поражение в год эпифитотии  $\leq 10\%$ ) благодаря комбинации генов *Lr19* и *Lr24*. Каждый из этих генов сам по себе обладает частичной эффективностью, однако их сочетание, возможно, усиливается за счет действия неустановленных дополнительных генов, которые предстоит выявить.

Сорта 'Казанская Юбилейная', 'Сакара' и 'Хаят' несут комбинацию *Lr34+Lr46*, которая по опубликованным данным (Vokore et al., 2022) обычно обеспечивает долговременную устойчивость. Однако в наших условиях эти сорта показали лишь среднюю или низкую устойчивость. Вероятно, это связано с влиянием климатических факторов – в частности, повышенных температур, при которых эффективность *Lr34* снижается (Plotnikova et al., 2018; Leonova et al., 2020). В не эпифитотийные годы сорта 'Балкыш', 'Баракат', 'Буляк', 'Хазинэ', 'Чистопольская' и 'Иделле' показали поражение в поле не выше 10%, что свидетельствует о наличии у них эффективных комбинаций генов устойчивости и/или адаптивных физиологических механизмов.

Комплекс *Lr37/Yr17/Sr38* (маркер Ventriup/LN2), обеспечивающий устойчивость к бурой, жёлтой и стеблевой ржавчинам, не был обнаружен ни в одном из изученных нами образцов. С использованием праймеров для маркера Ventriup/LN2 не был выявлен ген *Sr38* также и у сортов яровой пшеницы (Baranova et al., 2023). Это указывает либо на ограниченное использование этого интрогрессивного блока (от *Aegilops ventricosa*) в селекции сортов татарстанского происхождения, либо невысокую специфичность данного маркера в отношении генов устойчивости к бурой ржавчине.

Полученные результаты подчёркивают, что ДНК мар-

керы являются индикаторами, а не абсолютным доказательством устойчивости сорта. Не все выбранные для анализа маркеры обладают необходимой специфичностью, что требует дальнейшей верификации изученных сортов с использованием большей панели маркеров. Эффективность того или иного гена зависит от генетического фона растения, экологических условий и расового состава патогена. Поэтому достоверную оценку устойчивости возможно получить только при комплексном подходе, включающем как молекулярно-генетический анализ, так и фитопатологические испытания, как в условиях естественного заражения, так и при искусственной инокуляции или эпифитотии. Совмещение этих методов обеспечивает надёжную интерпретацию результатов и позволяет выявлять генотипы с потенциально долговременной устойчивостью, пригодные для дальнейшего использования в селекционных программах в качестве источников устойчивости.

### Заключение

Для оценки генетического разнообразия современных татарстанских сортов яровой мягкой пшеницы, допущенных к выращиванию в Российской Федерации, по устойчивости к бурой листовой ржавчине была проведена полевая оценка, а также ДНК-анализ на наличие/отсутствие генов устойчивости *Lr*. Результаты идентификации генов *Lr9*, *Lr19*, *Lr24*, *Lr34*, *Lr46* выявили наличие гена *Lr9* у 70% изучаемых сортов. За три года полевых испытаний эпифитотия бурой ржавчины наблюдалась лишь в 2025 году. Среди 15 изученных сортов татарстанской селекции наибольшей устойчивостью к бурой ржавчине отличились 'Наставник', 'Хазинэ' и 'Чистопольская', что подтверждено как молекулярно-генетическими методами, так и полевыми данными. Устойчивость этих сортов обеспечивалась разными комбинациями исследованных генов *Lr9+Lr24+Lr46* у сорта 'Наставник', *Lr19+Lr24* у сорта 'Хазинэ' и *Lr9+Lr24+Lr34* у сорта 'Чистопольская'. Сорт 'Хазинэ' характеризовался стабильно высокой устойчивостью к бурой ржавчине в течение всего периода наблюдений. Исключением стал 2025 год, когда в условиях выраженной эпифитотии уровень поражения составил около 10%. Вероятно, устойчивость данного сорта обусловлена вкладом **дополнительных, пока не идентифицированных генетических детерминант.**

Исследование выявило значительное генетическое разнообразие татарстанских сортов по комплексу генов *Lr* и подтвердило перспективность стратегии пирамидирования генов с обязательной полевой валидацией их эффективности. Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего отбора и создания сортов пшеницы с долговременной устойчивостью к бурой листовой ржавчине.

- Agarwal P., Jha S.K., Sharma N.K., Raghunanadan K., Mallick N., Niranjana M., Saharan M.S., Singh J.B., Vinod. Identification of the improved genotypes with 2NS/2AS translocation through molecular markers for imparting resistance to multiple biotic stresses in wheat. *The Indian Journal of Genetics and Plant Breeding*. 2021;81(4):522-528. DOI: 10.31742/IJGPB.81.4.4
- Askhadullin D.F., Askhadullin D.F., Vasilova N.Z., Tazutdinova M.R., Khusainova I.I., Gaifullina G.R. Characteristics of the efficiency of leaf rust resistance genes of spring wheat in the conditions of the Republic of Tatarstan. *Grain Economy of Russia*. 2023;(4):109-113. [In Russian] (Асхадуллин Д.Ф., Асхадуллин Д.Ф., Василова Н.З., Тазутдинова М.Р., Хусайнова И.И., Гайфуллина Г.Р. Характеристика эффективности генов устойчивости к листовой бурой ржавчине яровой пшеницы в условиях Республики Татарстан. *Зерновое хозяйство России*. 2023;(4):109-113). DOI: 10.31367/2079-8725-2023-87-4-109-113
- Baranova O.A., Solyanikova V., Kyrova E., Kon'kova E., Gaponov S., Sergeev V., Shevchenko S., Mal'chikov P., Dolzhenko D., Beshalova L., Ablova I., Tarhov A., Vasilova N., Askhadullin D., Askhadullin D., Sibikeev S. Evaluation of resistance to stem rust and identification of *Sr* genes in Russian spring and winter wheat cultivars in the Volga region. *Agriculture*. 2023;13(3):635. DOI: 10.3390/agriculture13030635
- Başer İ. Comparison of bread wheat genotypes for leaf rust resistance genes. *Journal of Agricultural Sciences*. 2020;26(1):22-31.
- Bokore F.E., Knox R.E., Hiebert C.W., Cuthbert R.D., DePauw R.M., Meyer B., N'Diaye A., Pozniak C.J., McCallum B.D. A combination of leaf rust resistance genes, including *Lr34* and *Lr46*, is the key to the durable resistance of the Canadian wheat cultivar, Carberry. *Frontiers in Plant Science*. 2022;6(12):775383. DOI: 10.3389/fpls.2021.775383
- Caldwell R.M. Breeding for general and/or specific plant disease resistance. *Proceedings of the Third International Wheat Genetics Symposium*. Canberra: Australian Academy of Sciences; 1968. p.263-272.
- Dakouri A., McCallum B.D., Radovanovic N., Cloutier S. Molecular and phenotypic characterization of seedling and adult plant leaf rust resistance in a world wheat collection. *Molecular Breeding*. 2013;32:663-677. DOI: 10.1007/s11032-013-9899-8
- Gulyaeva E.I., Shaydayuk E.L. Identification of leaf rust resistance genes in the new Russian varieties of common wheat. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2021;4(2):15-27. [in Russian] (Гульяева Е.И., Шайдаюк Е.Л. Идентификация генов устойчивости к бурой ржавчине у новых российских сортов мягкой пшеницы. *Биотехнология и селекция растений*. 2021;4(2):15-27). DOI: 10.30901/2658-6266-2021-2-02
- Gulyaeva E., Gannibal P., Shaydayuk E. Long-term studies of wheat leaf rust in the north-western region of Russia. *Agriculture*. 2023; 13(2):255. DOI: 10.3390/agriculture13020255
- Gulyaeva E.I., Kanyuka I.A., Alpatova N.V., Baranova O.A., Dmitriev A.P., Pavlyushin V.A. Molecular approaches in identifying leaf rust resistance genes in Russian wheat varieties. *Russian Agricultural Sciences*. 2009;35(5):316-319. DOI: 10.3103/S1068367409050085
- Gulyaeva E., Shaydayuk E., Rsaliyev A. Identification of leaf rust resistance genes in spring soft wheat samples developed in Russia and Kazakhstan. *Plant Protection News*. 2019;(3):41-49. [in Russian] (Гульяева Е.И., Шайдаюк Е.Л., Рсалиев А.С. Идентификация генов устойчивости к бурой ржавчине у образцов яровой мягкой пшеницы российской и казахстанской селекции. *Вестник защиты растений*. 2019;(3):41-49). DOI: 10.31993/2308-6459-2019-3(101)-41-49
- Gulyaeva E., Shaydayuk E., Kazartsev I., Akhmetova A., Kosman E. Microsatellite analysis of *Puccinia triticina* from *Triticum* and *Aegilops* hosts. *Australasian Plant Pathology*. 2018;47(2):163-170. DOI: 10.1007/s13313-018-0542-3
- Gulyaeva E.I., Sibikeev S.N., Druzhin A.E., Shaydayuk E.L. Enlargement of genetic diversity of spring bread wheat resistance to leaf rust (*Puccinia triticina* Eriks.) in lower Volga region. *Agricultural Biology*. 2020;55(1):27-44. [in Russian] (Гульяева Е.И., Сибикеев С.Н., Дружин А.Е., Шайдаюк Е.Л. Расширение генетического разнообразия сортов яровой мягкой пшеницы

- по устойчивости к бурой ржавчине (*Puccinia triticina* Eriks.) в Нижнем Поволжье. *Сельскохозяйственная биология*. 2020;55(1):27-44. DOI: 10.15389/agrobiology.2020.1.27rus
- Kadkhodaei M., Dadkhodaie A., Assad M.T., Haidari B., Mostowfizadeh-Ghalmfarsa R. Identification of the leaf rust resistance genes *Lr9*, *Lr26*, *Lr28*, *Lr34*, and *Lr35* in a collection of Iranian wheat genotypes using STS and SCAR markers. *Journal of Crop Science and Biotechnology*. 2012;15:267-274. DOI: 10.1007/s12892-012-0035-9
- Kiseleva M.I., Kolomiets T.M., Pakholkova E.V., Zhemchuzhina N.S., Lubich V.V. The differentiation of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars for resistance to the most harmful fungal pathogens. *Agricultural Biology*. 2016;51(3):299-309. [in Russian] (Киселева М.И., Коломиец Т.М., Пахолкова Е.В., Жемчужина Н.С., Любич В.В. Дифференциация сортов озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) по устойчивости к фитопатогенным грибам. *Сельскохозяйственная биология*. 2016;51(3):299-309). DOI: 10.15389/agrobiology.2016.3.299rus
- Koláriková L., Svobodová-Leišová L., Hanzalová A., Holubec V., Jungová M., Esimbekova M. Leaf rust resistance genes in *Aegilops* genus: occurrence and efficiency. *European Journal of Plant Pathology*. 2023;167:335-348. DOI: 10.1007/s10658-023-02712-0
- Kolmer J.A., Bajgain P., Rouse M.N., Li J., Zhang P. Mapping and characterization of the recessive leaf rust resistance gene *Lr83* on wheat chromosome arm 1DS. *Theoretical and Applied Genetics*. 2023;136(5):115. DOI: 10.1007/s00122-023-04361-7
- Lagudah E.S., McFadden H., Singh R., Huerta-Espino J., Bariana H., Spielmeier W. Molecular genetic characterization of the *Lr34/Yr18* slow rusting resistance gene region in wheat. *Theoretical and Applied Genetics*. 2006;114:21-30. DOI: 10.1007/s00122-006-0406-z
- Leonova I.N., Skolotneva E.S., Salina E.A. Genome-wide association study of leaf rust resistance in Russian spring wheat varieties. *BMC Plant Biology*. 2020;20 (Suppl 1):135. DOI: 10.1186/s12870-020-02333-3
- Liu Y., Gebrewahid T., Zhang P., Li Z., Liu D. Identification of leaf rust resistance genes in common wheat varieties from China and foreign countries. *Journal of Integrative Agriculture*. 2021;20:1302-1313. DOI: 10.1016/S2095-3119(20)63371-8
- Makarov A.A., Strizhekozina Yu.A., Solomatina D.A., Demicheva T.A., Kuhtina A.V. Quantitative classification of wheat varieties according to the degree of race-nonspecific resistance to leaf rust (Kolichestvennaya klassifikatsiya sortov pshenitsy po stepeni rasonespetsificheskoy ustoychivosti k buroy rzhavchine). In: *Immunity of agricultural crops to pathogens of fungal diseases (Immunitet sel'skokhozyaystvennykh kul'tur k vozбудитelyam gribnykh bolezney)*. Moscow; 1991. p.105-110. [in Russian] (Макаров А.А., Стрижекозина Ю.А., Соломатина Д.А., Демичева Т.А., Кухтина А.В. Количественная классификация сортов пшеницы по степени расонеспецифической устойчивости к бурой ржавчине. В кн.: *Иммунитет сельскохозяйственных культур к возбудителям грибных болезней*. Москва; 1991. С.105-110).
- McCallum B.D., Hiebert C.W., Cloutier S., Bakkeren G., Rosa S.B., Humphreys D.G., Marais G.F., McCartney C.A., Panwar V., Rampitsch C., Saville B.J., Wang X. A review of wheat leaf rust research and the development of resistant cultivars in Canada. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 2016;38:1-18. DOI: 10.1080/07060661.2016.1145598
- Mohan R., Singh V.K., Chetan K.K., Rani L.U., Sameriya K.K., Kumar S., Bainsla N.K., Senthilraja G., Saharan M.S. Multiple patho-phenotyping and molecular analysis to characterize wide-spectrum durable leaf rust resistance in wheat collections from India. *Frontiers in Microbiology*. 2025;16:1596282. DOI: 10.3389/fmicb.2025.1596282
- Mourad A.M.I., Draz I.S., Omar G.E., Börner A., Esmail S.M. Genome-Wide Screening of Broad-Spectrum Resistance to Leaf Rust (*Puccinia triticina* Eriks) in Spring Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Frontiers in Plant Science*. 2022;13:921230. DOI: 10.3389/fpls.2022.921230
- Omara R.I., Nehela Y., Mabrouk O.I., Elsharkawy M.M. The emergence of new aggressive leaf rust races with the potential to supplant the resistance of wheat cultivars. *Biology*. 2021;10:925. DOI: 10.3390/biology10090925
- Peterson R.F., Campbell A.B., Hannah A.E. A diagrammatic scale for estimating rust intensity on leaves and stems of cereals. *Canadian Journal of Research*. 1948;26(5):496-500. DOI: 10.1139/cjr48c-033
- Plotnikova L.Ya., Meshkova L.V., Gulyaeva E.I., Mitrofanova O.P., Lapochkina I.F. A tendency towards leaf rust resistance decrease in common wheat introgression lines with genetic material from *Aegilops speltoides* Tausch. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2018;22(5):560-567. [in Russian] (Плотникова Л.Я., Мешкова Л.В., Гульяева Е.И., Митрофанова О.П., Лапочкина И.Ф. Тенденция преодоления устойчивости к бурой ржавчине интрогрессивных линий мягкой пшеницы с генетическим материалом *Aegilops speltoides* Tausch. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2018;22(5):560-567). DOI: 10.18699/VJ18.395
- Prasad P., Savadi S., Bhardwaj S.C., Gupta P.K. The progress of leaf rust research in wheat. *Fungal Biology*. 2020;124:537-550. DOI: 10.1016/j.funbio.2020.02.013
- Raghuandan K., Tanwar J., Patil S.N., Chandra A.K., Tyagi S., Agarwal P., Mallick N., Murukan N., Kumari J., Sahu T.K., Jacob S.R., Kumar A., Yadav S., Nyamgoud S., Vinod, Singh A.K., Jha S.K. Identification of novel broad-spectrum leaf rust resistance sources from khapli wheat landraces. *Plants*. 2022;11(15):1965. DOI: 10.3390/plants11151965
- Riaz M., Wong Y. Estimation of yield losses due to leaf rust and late seeding on wheat (*Triticum aestivum* L.) variety Seher-06 in district Faisalabad, Punjab, Pakistan. *Advances in Biotechnology & Microbiology*. 2017;5(2):555657. DOI: 10.19080/AIBM.2017.05.555657
- Roelfs A.P. Barley stripe rust in Texas. *Plant Disease*. 1992;76:538. DOI: 10.1094/PD-76-0538C
- Samborski D.J., Dyck P.L. Enhancement of resistance to *Puccinia recondita* by interactions of resistance genes in wheat. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 1982;4(2):152-156. DOI: 10.1080/07060668209501317
- Sanin S.S., Neklesa N.P., Sanina A.A., Paholkova E.V. Methodological recommendations on the creation of infectious backgrounds for immunological studies of wheat (Metodicheskie rekomendatsii po sozdaniyu infektsionnykh fonov dlya immunologicheskikh issledovaniy pshenitsy). Moscow; 2008. [in Russian] (Санин С.С., Неклеса Н.П., Санина А.А., Пахолкова Е.В. Методические рекомендации по созданию инфекционных фонов для иммунологических исследований пшеницы. Москва; 2008).
- Selyaninov G.T. On agricultural climate assessment (O sel'skokhozyaystvennoy otsenke klimata). In: *Works on agricultural meteorology = Trudy po sel'skokhozyaystvennoy meteorologii. Issue 20*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1928. p.165-177. [in Russian] (Селянинов Г.Т. О сельскохозяйственной оценке климата. В кн.: *Труды по сельскохозяйственной метеорологии*, Ленинград: Гидрометеоиздат; 1928. Вып. 20. С.165-177).
- Shishkin N.V., Derova T.G., Gulyaeva E.I., Shaydayuk E.L. Identification of the genes resistant to brown rust in winter soft wheat varieties with the use of conventional and modern research methods. *Grain Economy of Russia*. 2018;(5):63-67. [in Russian] (Шишкин Н.В., Дерова Т.Г., Гульяева Е.И., Шайдаюк Е.Л. Определение генов устойчивости к бурой ржавчине у сортов озимой мягкой пшеницы с использованием традиционных и современных методов исследований. *Зерновое хозяйство России*. 2018;(5):63-67). DOI: 10.31367/2079-8725-2018-59-5-63-67
- Singh R.P., Singh P.K., Rutkoski J., Hodson D.P., He X., Jørgensen L.N., Hovmöller M.S., Huerta-Espino J. Disease impact on wheat yield potential and prospects of genetic control. *Annual Review of Phytopathology*. 2016;54(1):303-22. DOI: 10.1146/annurev-phyto-080615-095835
- Skolotneva E.S., Kelbin V.N., Shamanin V.P., Boyko N.I., Aparina V.A., Salina E.A. The gene *Sr38* for bread wheat breeding in Western Siberia. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2021;25(7):740-745. DOI: 10.18699/VJ21.084
- Volkova G., Kudinova O., Vaganova O., Agapova V. Effectiveness of leaf rust resistance genes in the adult and juvenile stages in Southern Russia in 2011-2020. *Plants*. 2022;11(6):793. DOI: 10.3390/plants11060793
- Xu B., Shen T., Chen H., Li H., Rehman S.U., Lyu S., Hua L., Wang G., Zhang C., Li K., Li H., Lan C., Chen G.Y., Hao M., Chen S. Mapping and characterization of rust resistance genes *Lr53* and

- Yr35* introgressed from *Aegilops* species. *Theoretical and Applied Genetics*. 2024;137(5):113. DOI: 10.1007/s00122-024-04616-x
- Yan X., Gebrewahid T.-W., Dong R., Li X., Zhang P., Yao Z., Li Z. Identification of known leaf rust resistance genes in bread wheat cultivars from China. *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding*. 2021;57:91-101. DOI: 10.17221/6/2021-CJGPB
- Zhang L., Zhao X., Liu J., Wang X., Gong W., Zhang Q., Liu Y., Yan H., Meng Q., Liu D. Evaluation of the resistance to Chinese predominant races of *Puccinia triticina* and analysis of effective leaf rust resistance genes in wheat accessions from the U.S. National Plant Germplasm System. *Frontiers in Plant Science*. 2022;(13):1054673. DOI: 10.3389/fpls.2022.1054673
- Zhang W., Dubcovsky J. Association between allelic variation at the *Phytoene synthase 1* gene and yellow pigment content in the wheat grain. *Theoretical and Applied Genetics*. 2008;116:635-645. DOI: 10.1007/s00122-007-0697-8
- Zhogaleva O.S., Vozzhova N.N., Shumskaya O.V., Dubina A.Yu., Ivanisov M.M. Screening of leaf rust resistance genes (*Lr*) in the breeding lines of winter bread wheat. *Grain Economy of Russia*. 2022;(6):23-28. [in Russian] (Жогалева О.С., Вождова Н.Н., Шумская О.В., Дубина А.Ю., Иванисов М.М. Скрининг генов устойчивости к бурой ржавчине (*Lr*) у селекционных линий озимой мягкой пшеницы. *Зерновое хозяйство России*. 2022;14(6):23-28). DOI: 10.31367/2079-8725-2022-83-6-23-28

### Информация об авторах

**Виктория Викторовна Костенко**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория «Геномика растений»; доцент, кафедра генетики, Институт фундаментальной медицины и биологии, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008 Россия, Республика Татарстан, Казань, ул. Кремлевская, 18, корп. 1, vvkostenkol@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1118-1471>

**Наталья Борисовна Баранова**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория «Геномика растений»; доцент, кафедра генетики, Институт фундаментальной медицины и биологии, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008 Россия, Республика Татарстан, Казань, ул. Кремлевская, 18, корп. 1, natalja-b@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9109-7378>

**Дамир Фидусович Асхадуллин**, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория селекции яровой пшеницы, Татарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук», 420059 Россия, Республика Татарстан, Казань, ул. Оренбургский тракт, 48; старший научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория «Геномика растений», Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008 Россия, Республика Татарстан, Казань, ул. Кремлевская, 18, корп.1, trulik@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2717-7178>

**Данил Фидусович Асхадуллин**, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория селекции яровой пшеницы, Татарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», 420059 Россия, Республика Татарстан, Казань, ул. Оренбургский тракт, 48, tatnii-rape@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2601-6735>

**Мира Леонидовна Пономарева**, доктор биологических наук, заведующая, научно-исследовательская лаборатория «Геномика растений», профессор, кафедра генетики, Институт фундаментальной медицины и биологии, Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008 Россия, Республика Татарстан, Казань, ул. Кремлевская, 18, корп.1; главный научный сотрудник, Татарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное структурное подразделение Федерального исследовательского центра «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», 420059 Россия, Республика Татарстан, Казань, ул. Оренбургский тракт, 48, smponomarev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1648-3938>

### Information about the authors

**Victoria V. Kostenko**, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Research Laboratory “Plant Genomics”; Associate Professor, Department of Genetics, Institute of Fundamental Medicine and Biology, Kazan (Volga Region) Federal University, 18, Kremlevskaya Street, Kazan, Republic of Tatarstan, 420008 Russia, vvkostenkol@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-1118-1471>

**Natalia B. Baranova**, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Research Laboratory “Plant Genomics”; Associate Professor, Department of Genetics, Institute of Fundamental Medicine and Biology, Kazan (Volga Region) Federal University, 18, Kremlevskaya Street, Kazan, Republic of Tatarstan, 420008 Russia, natalja-b@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9109-7378>

**Damir F. Askhadullin**, Senior Researcher, Research Laboratory “Plant Genomics”, Kazan (Volga Region) Federal University, 18, Kremlevskaya Street, Kazan, Republic of Tatarstan, 420008 Russia; Leading Researcher, Spring Wheat Breeding Laboratory, Tatar Research Institute of Agriculture – Subdivision of the Federal Research Center “Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences”, 48, Orenburgskii tract Street, Kazan, Republic of Tatarstan, 420059 Russia, trulik@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2717-7178>

**Danil F. Askhadullin**, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Spring Wheat Breeding Laboratory, Tatar Research Institute of Agriculture – Subdivision of the Federal Research Center “Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences”, 48, Orenburgskii tract Street, Kazan, Republic of Tatarstan, 420059 Russia, tatnii-rape@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2601-6735>

**Mira L. Ponomareva**, Dr. Sci. (Biology), Professor, Head, Research Laboratory “Plant Genomics”, Kazan (Volga Region) Federal University, 18, Kremlevskaya Street, Kazan, Republic of Tatarstan, 420008 Russia; Chief Researcher, Tatar Research Institute of Agriculture – Subdivision of the Federal Research Center “Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences”, 48, Orenburgskii tract Street, Kazan, Republic of Tatarstan, 420059 Russia, smponomarev@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1648-3938>

**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 15.11.2025; одобрена после рецензирования 12.02.2026; принята к публикации 20.03.2026.

The article was submitted on 15.11.2025; approved after reviewing on 12.02.2026; accepted for publication on 20.03.2026.

Научная статья

УДК 634.22:575.174:577.21

DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-06



## Оценка эффективности маркеров S-локуса для выявления самофертильных форм на материале коллекции косточковых культур Майкопской опытной станции – филиала ВИР

А. К. Макаов<sup>1</sup>, О. Е. Радченко<sup>1</sup>, А. И. Яремкив<sup>2</sup>, О. Ю. Антонова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Адыгейский государственный университет, Майкоп, Россия

**Автор, ответственный за переписку:** Макаов Адам Капанович, a.makaov@vir.nw.ru

**Актуальность.** S-локус, контролирующей систему гаметофитной несовместимости у видов семейства Розовые, отличается высокой степенью аллельного разнообразия, которое с успехом используется для S-генотипирования и молекулярной паспортизации, а также для уточнения филогенетических взаимоотношений между видами. В практическом плане изучение S-локуса важно также для выявления мутантных аллелей, приводящих к самофертильности. Недавно у сливы домашней *Prunus domestica* L. была установлена ассоциация данного признака с присутствием в геноме аллеля *S17*, и были разработаны специфичные праймеры для его идентификации. Целью нашей работы было выявление маркеров данного аллеля в выборке образцов коллекций косточковых, поддерживаемых на Майкопской опытной станции – филиале ВИР и НПБ «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР», а также определение их эффективности в параллельном фенотипическом анализе. **Материалы и методы.** Молекулярный скрининг проводили с использованием праймеров, специфичных для аллеля *S17*, и консенсусных праймеров PruC2/PCER. Параллельно в течение двух лет (2024 и 2025 годов) образцы сливы и алычи были фенотипированы по признаку самофертильности с использованием методики, принятой в ВИР. **Результаты и обсуждение.** Изучена выборка из 266 образцов косточковых культур коллекции Майкопской опытной станции, из них 76 образцов алычи *Prunus cerasifera* Ehrh., 150 образцов сливы домашней *P. domestica*, один образец сливы североамериканской *Prunus americana* Marsh., один образец сливы канадской *Prunus nigra* Aiton, три образца сливы русской *Prunus × rossica* Erem. и 35 образцов терна *Prunus spinosa* L. Выявлено 16 образцов – носителей аллеля *S17*. Параллельно в течение двух сезонов (2024 и 2025 годов) для значительной части выборки, 124 образцов алычи и сливы домашней, оценили способность растений формировать плоды при опылении собственной пыльцой. Число самофертильных образцов у гексаплоидной сливы домашней составило 56,1%, а у алычи – только 5,9%. Данные результаты полностью согласуются с описанным в литературе явлением широкого распространения самофертильных форм среди полиплоидных организмов. При этом большинство самофертильных образцов не имели аллеля *S17*, то есть их самоплодность должна объясняться какими-то другими причинами. С другой стороны, почти все образцы сливы домашней с аллелем *S17* оказались самофертильными. **Заключение.** Сопоставление результатов молекулярного скрининга и фенотипического анализа показало, что аллель *S17* у сливы домашней действительно проявляет ассоциацию со свойством самосовместимости, однако у *P. domestica* должны существовать и другие мутантные варианты, приводящие к нарушению механизмов деградации собственных пыльцевых трубок. У диплоидной алычи такой ассоциации не наблюдается. Выявленные в процессе анализа самофертильные образцы с маркерами аллеля *S17*, представляют большой интерес для селекции, поскольку их можно непосредственно использовать в маркер-вспомогательном отборе.

**Ключевые слова:** *Prunus domestica*, *P. cerasifera*, S-локус, самофертильность, молекулярные маркеры

**Благодарности:** работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания FGEM-2022-0008 «Совершенствование подходов и методов *ex situ* сохранения идентифицированного генофонда плодовых, ягодных культур, винограда и их диких родичей, разработка технологий их эффективного использования в селекции»

**Для цитирования:** Макаов А.К., Радченко О.Е., Яремкив А.И., Антонова О.Ю. Оценка эффективности маркеров S-локуса для выявления самофертильных форм на материале коллекции косточковых культур Майкопской опытной станции – филиала ВИР. *Биотехнология и селекция растений*. 2026;9(1):29-37. DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-06

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.

© Макаов А.К., Радченко О.Е., Яремкив А.И., Антонова О.Ю., 2026

## Original article

DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-06

## The evaluation of the effectiveness of S-locus markers for identifying self-fertile forms using the material from the stone fruit collection of the Maykop Experimental Station – Branch of VIR

Adam K. Makaov<sup>1</sup>, Olga E. Radchenko<sup>1</sup>, Alexander I. Yaremkiy<sup>2</sup>, Olga Yu. Antonova<sup>1</sup><sup>1</sup>N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), St. Petersburg, Russia<sup>2</sup>Adyghe State University, Maikop, Russia**Corresponding author:** Adam K. Makaov, a.makaov@vir.nw.ru

**Background.** The S-locus, which controls the system of gametophytic incompatibility in the species of the Rosaceae family, is characterized by a high degree of allelic diversity, which is successfully used for S-genotyping and molecular certification, as well as for clarifying the phylogenetic relationships between species. In practical aspect, the study of the S locus is also important for identifying self-fertility mutations affecting pollen specificity. Recently, an association of this trait with the presence of the *S17* allele in the genome of the domestic plum *Prunus domestica* L. has been established, and specific primers for its identification developed. The aim of our work was to identify markers of this allele in accessions of stone fruit collections maintained at the Maykop Experimental Station – a branch of VIR and the Pushkin and Pavlovsk Laboratories of VIR, and to determine their effectiveness in parallel phenotypic analysis. **Materials and methods.** Molecular screening was performed using *S17* allele specific primers and consensus primers PruC2/PCER. In parallel, over the course of two years (2024 and 2025), plum and cherry plum accessions were phenotyped for self-fertility using the methodology adopted at VIR. **Results and discussion.** A subset of 266 stone fruit accessions was studied, including 76 accessions of cherry plum *Prunus cerasifera* Ehrh., 150 accessions of domestic plum *P. domestica*, one accession of North American plum *Prunus americana* Marsh., one accession of Canadian plum *Prunus nigra* Aiton, three samples of Russian plum *Prunus* × *rossica* Erem. and 35 of blackthorn *Prunus spinosa* L. Sixteen accessions were identified as carriers of the *S17* allele. In parallel, a significant part of the experimental subset, 124 accessions of domestic plum and cherry plum, was phenotyped, and the ability of plants to form fruits when pollinated with their own pollen assessed. The portion of self-fertile accessions of hexaploid European plum was 56.1%, while for cherry plum only 5.9%. These results are fully consistent with the phenomenon of widespread self-fertile forms among polyploid organisms described in the literature. Most self-fertile accessions did not have the *S17* allele, that is, their self-fertility should be explained by some other reasons. On the other hand, almost all accessions of European plum with the *S17* allele were self-fertile. **Conclusions.** Comparison of the molecular screening results and phenotypic analysis data showed that the *S17* allele in the domestic plum does indeed exhibit an association with the self-compatibility property, but *P. domestica* may also have other mutant variants that disrupt the degradation mechanisms of its own pollen tubes. No such association is observed in diploid cherry plum. The self-fertile accessions with markers of the *S17* allele identified during the analysis are of great interest for breeding, since they can be directly used in marker-assisted selection.

**Keywords:** *Prunus domestica*, *P. cerasifera*, S-locus, self-compatibility, molecular markers

**Acknowledgements:** the research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the State Assignment to VIR, Theme Plan Project No. FGEM-2025-0004 “Improving the approaches and methods for *ex situ* conservation of the identified genetic diversity of vegetatively propagated crops and their wild relatives, and development of technologies for their effective utilization in plant breeding”

**For citation:** Makaov A.K., Radchenko O.E., Yaremkiy A.I., Antonova O.Yu. The evaluation of the effectiveness of S-locus markers for identifying self-fertile forms using the material from the stone fruit collection of the Maykop Experimental Station – Branch of VIR. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2026;9(1):29-37. (In Russ.). DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-06

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.

© Makaov A.K., Radchenko O.E., Yaremkiy A.I., Antonova O.Yu., 2026

## Введение

Система самонесовместимости (self-incompatibility, SI) – широко распространённый в мире цветковых растений механизм, препятствующий самооплодотворению либо за счет строения цветка (гетероморфный тип), либо путем отторжения собственной пыльцы – гомоморфный тип, который, в свою очередь, представлен двумя вариантами: гаметофитная (GSI) и спорофитная (SSI) самонесовместимость (Kao, Huang, 1994). В случае GSI несомовместимость определяется генотипом самой гаплоидной пыльцы, мужского гаметофита, на стадии роста пыльцевой трубки, в то время как при SSI решающую роль играет генотип тканей пестика диплоидного материнского растения, а именно спорофита.

Механизм GSI у семейства Rosaceae (Розовые) в основном контролируется одним локусом S со множественными аллелями; кроме того, существуют гены “модификаторы” (Matsumoto et al., 2012). Строение S-локуса у видов рода *Prunus* очень своеобразно. Он имеет размер всего около 70 тпн, содержит один ген S-РНКазы (*S-RNase*), продукты которого работают в тканях пестика и катализируют деградацию РНК в прорастающей пыльцевой трубке, а также один ген *SFB*, кодирующий F-box-белок (S specific F-box protein), и экспрессирующийся в пыльце (Wu et al., 2013; Xu et al., 2013). Присутствие единичного гена *SFB* является специфичным для рода *Prunus* L., поскольку для других родов семейства Розовые, таких как *Pyrus* L. и *Malus* Mill., характерно наличие его множественных копий, получивших название *SFBBs* (*S locus F-box brothers*). Локус S фланкирован несколькими копиями генов *SLFL* (*S-locus F-box-like*), которые, однако, не участвуют в определении специфичности пыльцы (Matsumoto, Tao, 2016a; 2016b).

S-РНКазы – это гликопротеин, проявляющий рибонуклеазную активность и расщепляющий РНК в прорастающих пыльцевых трубках. У видов семейства Розовые ген *S-RNase* имеет пять консервативных доменов, один из которых специфичен только для этого семейства, и один гипервариабельный домен, внутри которого находится полиморфный по длине интрон. В кодирующей последовательности генов *S-RNase* у рода *Prunus* L. имеется также дополнительный интрон (Tao et al., 1999a). Филогенетический анализ S-РНКазы и родственных последовательностей показал, что система GSI, основанная на активности S-РНКазы, имеет единое эволюционное происхождение, восходящее к временам примерно 120 миллионов лет назад (Igis, Kohn, 2001; Vieira et al., 2008a).

В гене *SFB* у *Prunus* присутствуют три вариабельных (Vn, V1 и V2) и два гипервариабельных участка HVa и HVb (Nunes et al., 2006). Четыре из пяти вариабельных и гипервариабельных участков расположены в С-концевой области и могут влиять на аллель-специфичное распознавание субстрата. Функции F-box-белка у видов рода *Prunus* уникальны по сравнению с таковыми у растений других родов, даже сестринской подтрибы Malinae Rev.

(подсемейство Amygdaloideae Arn. семейства Розовые). У большинства растений белок F-box входит в состав комплекса SCF: комплекс белков F-box, Skp1, Cullin1 и Rbx1, который опосредует целевую деградацию белка через убиквитин-26S протеасому. В этом комплексе белок F-box специфически распознает чужеродные S-РНКазы, после чего они полиубиквитируются и подвергаются деградации (Matsumoto, Tao, 2016a; 2016b); соответственно, собственная РНКазы остается активной и разрушает РНК в пыльцевых трубках.

У рода *Prunus* белок SFB наоборот – специфически распознает собственные S-РНКазы и индуцирует их цитотоксические функции. Эта модель предполагает наличие общего для всех РНКаз ингибитора GI (General Inhibitor), который образует комплексы со всеми присутствующими в клетке молекулами S-РНК. Белок F-box в составе комплекса SCF распознает комплекс собственной S-РНКазы с ингибитором, после чего GI-S-РНКазы подвергается полиубиквитинированию и деградации убиквитин-протеасомной системой, что приводит к высвобождению активных собственных S-РНКаз.

Оригинальность гена *SFB* у *Prunus* подтверждается и тем, что его последовательность при проведении кластерного анализа отходит в отдельную кладу, отличную от той, которая содержит последовательности, кодирующие F-box-белок у других представителей семейства Розовые, таких как яблоня и груша (триба Maleae в семействе Розовые) и у семейств Solanaceae и Plantaginaceae (Aguiar et al., 2015; Vieira et al., 2009). Показано, что у предковых видов розоцветных произошли затрагивающие S-локус дупликации, и при этом растения рода *Prunus* и трибы Maleae развили детерминант специфичности на основе различных паралофов (Aguiar et al., 2015; Morimoto et al., 2015).

Считается, что S-локус находится под действием балансирующего отбора (Wright, 1939), при котором редкие гаплотипы имеют селективное преимущество и с меньшей вероятностью теряются в результате генетического дрейфа. Поэтому в нем поддерживается значительная степень аллельного разнообразия, которое с успехом используется для генотипирования и молекулярной паспортизации, а также для изучения филогенетических взаимоотношений между видами секции *Euprunus* подрода *Prunophora*. Так, Sutherland с соавторами (Sutherland et al., 2008) выявили высокую степень консерватизма некоторых аллелей (*S1*, *S2*, *S17* и других) генов *S-RNase* и *SFB* между алычой, сливой домашней и другими видами рода *Prunus*, то есть определённые S-аллели сохранились на протяжении миллионов лет, передаваясь новым видам в процессе дивергентной эволюции. Наибольшая степень сходства была обнаружена между последовательностями гена *S-RNase* у видов *Prunus cerasifera* Ehrh, *Prunus domestica* L., *Prunus spinosa* L. и *Prunus salicina* Lindl. (Sutherland et al., 2008; Fernandez i Marti et al., 2021). Аналогично, при исследовании генетического разнообразия S-локуса у терна *P. spinosa* (Halász et al., 2021)

было показано перекрытие пулов *S*-аллелей между дикими популяциями терна и терносливой *Prunus domestica subsp. insititia* (Jusl.) Schneid, что подтверждает их эволюционную связь и возможность естественной гибридизации и, следовательно, значимость вклада аллельных вариантов *S*-локуса терна в формирование полиморфизма *S*-локуса у сливы домашней.

Первые работы по молекулярному определению аллелей *S*-локуса у представителей рода *Prunus* были проведены на черешне *Prunus avium* L. (секция *Cerasus* подрода *Cerasus*). Воšković с соавторами в 1996 году идентифицировали ген *S*-РНКаза как ключевой компонент самонесовместимости у черешни (Воšković et al., 1996). Позднее для детекции аллелей этого гена был создан ряд праймеров (Sonneveld et al., 2001; 2003). Праймеры были разработаны в двух вариантах – консенсусные праймеры PaConsI и PaConsII, выявляющие полиморфизм соответственно первого и второго интрона гена *S-RNase* путем генерации для каждого аллеля ампликонов определенной длины, и аллель-специфичные праймеры. Праймеры PaConsI и PaConsII позднее широко использовали для анализа многих розоцветных культур, в том числе для сливы домашней и родственных ей алычи и терна. Следует, однако, отметить, что для этих культур чаще использовали праймеры PaConsI (полиморфизм первого интрона), причем нередко в сочетании с другими консенсусными праймерами EM-PC1consRD и/или EM-PC2consRD (Sutherland et al., 2009; Halász et al., 2014; Abdallah et al., 2019; Fernandez i Marti et al., 2021). Для анализа полиморфизма во втором интроне более успешной признана другая пара праймеров PruC2/PCER, разработанная японскими исследователями (Tao et al., 1999b; Yamane et al., 2001).

Все эти праймеры генерируют у сливы домашней значительное количество полиморфных фрагментов, для которых, однако, до сих пор не существует общепризнанной классификации. Каждый автор в своей работе просто нумеровал выявляемые фрагменты, причем даже не опираясь на более ранние работы, использовавшие те же самые маркеры. Например, в работе Abdallah с соавторами (Abdallah et al., 2019) аллель *S1* генерирует с праймерами PRUC2/PCER фрагмент размером 470 пн. Другая группа исследователей (Fernandez i Marti et al., 2021) с теми же самыми праймерами определяет этот аллель по фрагменту 780 пн, а фрагмент 470 пн считает аллелем *S9*. В более ранней статье венгерских авторов (Halász et al., 2014) аллели *S*-локуса сливы вообще обозначены буквами латинского алфавита без привязки к размерам: приведены только фотографии электрофоретических спектров.

Аллель-специфичные праймеры разработаны в настоящее время для алычи (Sutherland et al., 2009) и терна (Vieira et al., 2008b). Что касается сливы домашней, то при помощи аллель-специфичной ПЦР можно идентифи-

цировать аллель *S17*, который авторы (Fernandes i Marti et al., 2021) ассоциируют с самоплодностью.

Анализ аллельных вариантов гена *SFB* у сливы обычно проводят при помощи праймеров Fbox5'F/FboxIntronR (Abdallah et al., 2019; Fernandez i Marti et al., 2021), исходно разработанных для черешни (Vaughan et al., 2006), или же праймеров PsSFB-F1 /PsSFB-R1 (Abdallah et al., 2021), созданных для сливы китайской *P. salicina* (Zhang et al., 2007).

Изучение *S*-локуса у сливы и родственных ей видов важно также для выявления мутантных аллелей, приводящих к утрате растениями способности разрушать пыльцевые трубки собственной прорастающей пыльцы, то есть к самофертильности. Недавно у сливы домашней была выявлена ассоциация данного признака с присутствием в геноме аллеля *S17*, и были разработаны специфичные праймеры для его идентификации. Целью нашей работы было выявление маркеров данного аллеля в выборке образцов коллекции косточковых, поддерживаемой на Майкопской опытной станции – филиале ВИР, а также на НПБ «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР», и определение их эффективности в фенотипическом анализе.

## Материалы и методы

**Растительный материал.** Выборка для определения аллельного разнообразия гена *S-RNase* включала 266 образцов, из них 76 образцов алычи *Prunus cerasifera* Ehrh., 150 образцов сливы домашней *P. domestica* L., один образец сливы североамериканской *P. americana* Marsh. (вид из секции *Prunoseranus* подрода *Prunus*), один образец сливы канадской *P. nigra* Aiton (вид из секции *Prunoseranus* подрода *Prunus*) три образца сливы русской (*Prunus* × *rossica*) и 35 образцов терна *P. spinosa* L. Частично использованные в работе образцы происходили из коллекции НПБ «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» (Приложение/ Supplement<sup>1</sup>).

Значительная часть выборки, изученной в молекулярном скрининге, была использована также в фенотипическом анализе для определения самофертильности/ самостерильности образцов (см. Приложение/ see the Supplement).

**Методы.** Выделение ДНК проводили методом СТАВ-экстракции в модификации, принятой в отделе биотехнологии ВИР (Antonova et al., 2020), для устранения полифенольных соединений применяли предварительную обработку растертой растительной ткани буфером на основе сорбитола (Inglis et al., 2018).

ПЦР-анализ выборки сливы, алычи и терна проводили с использованием праймеров, специфичных для идентификации аллеля *S17*, и консенсусных праймеров PruC2/PCER (табл. 1). ПЦР осуществляли в 20 мкл реакционной

<sup>1</sup> Приложение доступно в онлайн версии статьи/ The supplement is available in the online version of the paper: DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-06

смеси, содержащей 40 нг ДНК, 1× реакционный буфер (Диалат), 2,0 мМ MgCl<sub>2</sub>, по 0,5 мМ каждого из dNTP's, 250 нМ прямого и обратного праймеров, и 1 ед. Таq-полимеразы. Операции по смешиванию компонентов выполняли на льду. Условия реакции соответствовали рекоменда-

циям авторов праймеров (Fernandez i Marti et al., 2021).

Фенотипирование растений сливы и алычи по признаку самофертильности проводили с использованием методики, принятой в ВИР и опубликованной в Методических указаниях (Sedov, Ogol'tsova, 1999).

**Таблица 1. Праймеры, использованные в работе**

**Table 1. The primers used in the study**

№ п/п/ No. in order	Тип праймеров/ Primer type	Название/ Name	Последовательность 5'→3'/ Sequence 5'→3'	Ожидаемые размеры ПЦР- продуктов*/ Expected PCR product size	T <sup>o</sup> m, °C	Источник/ Reference
1	Консенсусные	PruC2	ctatggccaagtaattattcaaac	310-1350*	57	Tao et al., 1999b
		PCER	tgtttgttcattcgcyytccc			Yamane et al., 2001
2	Аллель- специфичные	S17_F	tcttcccttgcttggtgtct	205	57	Fernandez i Marti et al., 2021
		S17_R	tccatgtctgtgtcggatgt			

\* Размеры ампликонов приведены по Fernandez i Marti et al., 2021/

\* The amplicon sizes are given according to Fernandez i Marti et al., 2021

## Результаты и обсуждение

**Молекулярный скрининг.** При анализе с праймерами для идентификации аллеля *S17* у 18 образцов выборки были выявлены ПЦР-продукты размером примерно 250 пн (рис. 1 А). Этот результат не соответствовал ожидаемому, поскольку авторы маркера в качестве диагностического указывали фрагмент 205 пн (Fernandez i Marti et al., 2021). В реакции с консенсусными праймерами PruC2/PCER подавляющее большинство образцов с фрагментом S17-250 (16 из 18) генерировали в числе прочих ПЦР-продукт размером около 350 пн (рис. 1 В), что также не соответствовало размеру аллеля *S17*, описанному в статье Fernandez i Marti с соавторами как 395 пн.

Для прояснения ситуации мы обратились к исходной последовательности данного аллеля, депонированной в Генбанке NCBI под номером MW407938.1 (Fernandez i Marti et al., 2021). В ней были определены (рис. 2) места отжига специфичных праймеров S17-F 'TCTTCCCTTGCTTGGTGTCT' и S17-R 'TCCATGTCTGTGTGCGGATGT' (на рисунке последовательность представлена в ориентации reverse-complement 'ACATCCGACACAGACATGGA'), а также консенсусных праймеров PruC2 'STATGGCCAAGTAATATTCAAACC' и PCER 'TGTTTGTTCATTCGCTTCCC' (также представлен в ориентации reverse-complement 'GGGAARGCGAATGGAACAACA'). Интересно, что все праймеры, кроме S17-R, не полностью соответствовали последовательностям мест своего отжига (см. рис. 2),

тем не менее, ПЦР-реакция с ними протекала достаточно успешно.

После определения в последовательности аллеля *S17* мест отжига праймеров были установлены ожидаемые размеры ПЦР-продуктов: 247 пн для специфичных праймеров S17-F/R и 357 пн для консенсусных праймеров PruC2/PCER, что полностью соответствовало полученным нами результатам.

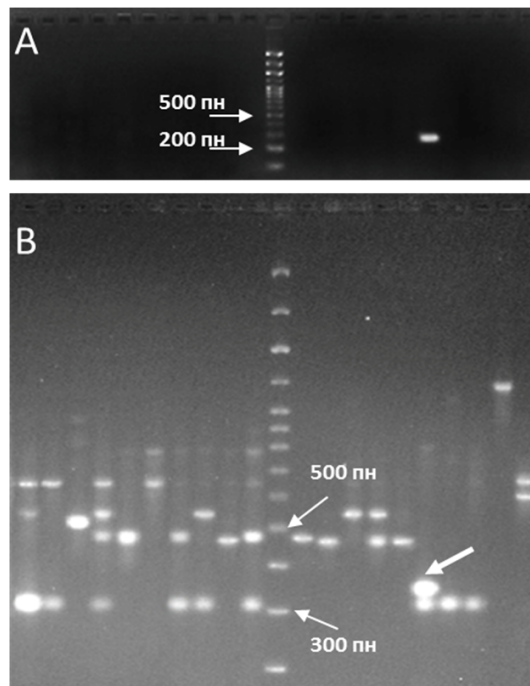
Таким образом, с помощью молекулярного скрининга нам действительно удалось идентифицировать образцы, несущие аллель *S17*, который, согласно опубликованным данным, связан с самоопылением у сливы домашней. Аллель диагностировали только в случае совпадения результатов ПЦР с обеими парами праймеров. В изученной выборке присутствовало всего 16 таких образцов, из них:

**девять** сортов сливы домашней – 'Zhucechella', к-28407; 'Аль Эрик', к-3316; 'Аусбухер', к-3353; 'Афъезка №4', к-30688; 'Бутылочная', к-10213; 'Венгерка Ажанская Красная', к-3405; 'Екатерина (Синяя)', к-12870; 'Империял', к-9697; 'Цуккета Империяле', к-4124);

**шесть** образцов алычи – Алыча УС-1-11, к-15597А; 'Бал Алыча', к-43208; Желток, к-12067; Ткемали 1, к-12074; Ткемали 88, к-12084; Ткемали Розовая 63, к-9783; **один** образец терна – Терн 67-Б3-13, к-2763А.

Следует отметить, что продукт амплификации с консенсусными праймерами размером 350 пн был выявлен еще у 10 образцов, у которых, однако, аллель-специфичная ПЦР оказалась неуспешной. В эту группу входили

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 M 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20



**Рис. 1. ПЦР-продукты ДНК сливы и алычи с аллель-специфичными праймерами S17 F/R (А) и с консенсусными праймерами PruC2/PCER (В)**

**На рисунке В стрелкой обозначен ПЦР-продукт, соответствующий аллелю S17.**

- 1 – *P. domestica*, Мирабель Крупная; 2 – *P. domestica*, ‘Венгерка Ранняя Майнская’; 3 – *P. domestica*, ‘Габровска’;  
 4 – *P. domestica*, Венгерка Сизая; 5 – *P. domestica*, Венгерка Ранняя ‘Франкфуртская’; 6 – *P. domestica*, Венгерка Шунтучка;  
 7 – *P. domestica*, Венгерка Цвикла; 8 – *P. domestica*, ‘Грас Румынский’; 9 – *P. domestica*, ‘Vision’; 10 – *P. domestica*, ‘Де Бистрита’;  
 11 – *P. domestica*, Деккен; 12 – *P. domestica*, Дряновска Слива; 13 – *Prunus* × *rossica* Erem., ‘Десертная’;  
 14 – *P. domestica*, ‘Джефферсон’; 15 – *P. domestica*, Дряновска Слива; 16 – *P. domestica*, ‘Екатерина’ (Синяя);  
 17 – *P. domestica*, ‘Диापре Ранняя’; 18 – *P. domestica*, ‘Гилберт’; 19 – *P. cerasifera*, ‘Baracan’; 20 – *P. domestica*, Империял Росса

**Fig. 1. PCR products of plum and cherry plum DNA with allele-specific primers S17 F/R (A) and with consensus primers PruC2/PCER (B)**

**In B, the arrow indicates the PCR product corresponding to the S17 allele.**

- 1 – *P. domestica*, Mirabel' Krupnaya; 2 – *P. domestica*, ‘Vengerka Rannyaya Majnskaya’; 3 – *P. domestica*, ‘Gabrovska’;  
 4 – *P. domestica*, Vengerka Sizaya; 5 – *P. domestica*, Vengerka Rannyaya ‘Frankfurtskaya’; 6 – *P. domestica*, Vengerka Shuntuchka;  
 7 – *P. domestica*, Vengerka Czvikla; 8 – *P. domestica*, ‘Gras Romy' niaska’; 9 – *P. domestica*, ‘Vision’;  
 10 – *P. domestica*, ‘De Bistruta’; 11 – *P. domestica*, Dekken; 12 – *P. domestica*, Dryanovska Sliva; 13 – *Prunus* × *rossica* Erem., ‘Desertnaya’;  
 14 – *P. domestica*, ‘Dzhefferson’; 15 – *P. domestica*, Dryanovska Sliva; 16 – *P. domestica*, ‘Ekaterina’ (Sinyaya);  
 17 – *P. domestica*, ‘Diapre Rannyaya’; 18 – *P. domestica*, ‘Gilbert’; 19 – *P. cerasifera*, ‘Baracan’; 20 – *P. domestica*, Imperial Rossa

два сорта алычи: ‘Гульрипшская 19’, к-43492; ‘Крупная Красная’ (Сбор 36), к-12858; **три** сорта сливы домашней: ‘Измамот’, к-28408; ‘Мзры Дамбуль’, к-43434; ‘Слива сб. 69’, к-9716) и **пять** образцов терна: Гребенского №6 сеянец, к-15943А; №24-8, к-7343А; №9-7, к-14586А; Нестеровского №4 сеянец 10-7, к-16017А; Терн Волжский, к-15084). Вполне вероятно, что фрагмент PruC2/PCER\_350 в этих образцах может также соответствовать некоторым другим аллелям. Характерно, что большую часть этой группы составляли образцы терна, последовательности S-локуса у которых могут сильно отличаться от таковых у сливы домашней.

**Фенотипический анализ.** Параллельно в течение двух сезонов, 2024 и 2025 гг., для значительной части

выборки – 124-х образцов алычи и сливы домашней, мы оценили способность растений формировать плоды при опылении собственной пыльцой (см. Приложение/ see the Supplement). При этом к самофертильным относили сорта, у которых число завязавшихся плодов составило более 10% от числа опыленных цветков (Yushev et al., 2016).

По результатам эксперимента число образцов сливы домашней, успешно завязавших плоды при опылении собственной пыльцой (Yushev et al., 2016), составило 56,1% (32 из 57 изученных). В то же время, у алычи было обнаружено только **четыре** самофертильных образца: Алыча 37А, к-4313; ‘Бал Алыча’, к-43208; Крупная Красная (Сбор 18), к-9748; ‘Мечубухе’ (Сбор 82), к-9758 – из 67 изученных, то есть 5,9% (табл. 2). Данные резуль-

GenBank: MW407938.1

ttcacaattcatggcctatggccaagtaactattcaaacccaacgatgccagtaattgcaatgggtcaaactttgag  
gcaaggaaagtggatcgtataggattgtattccacatactcttttagcatttacqttttagaaaaattagaccgtcat  
atatgaaaatcttccacgtacatcaaaaattaaaagtcagtataatagtcaggtttagttaaaaaacaatcqtat  
ccagaaatgaagatcttcccttaaaaatcttcccttacttgaatctcagtacccctcaattgcatccgaactggaga  
tatcttggcccgcgtggaagcggcagtgatataaaactttgggaaggagaatggaacaaacatggtagatgttcc  
gaacaaacacttaaccaaagtcaatacttgaacgatcccacgaaatgtggaactcgcaaatattacagagatcct  
taaaaacgcttcaatagtagccacatccgacacagacatggaataactcgacatagtagcagcattaaagcagca  
actaaaagaacaccctccttctgtgcaaacctcttccagcacagcctaacacacattcagcacagactaagagccc  
gccgaagcctcagttgttcatgaagtgttattt

**Рис. 2. Результаты анализа последовательности MW407938.1, депонированной в Генбанке NCBI как последовательность аллеля *S17 Prunus domestica* (по Fernandez i Marti et al., 2021)**

Последовательности аллель-специфичных праймеров выделены зеленым, последовательности консенсусных праймеров – желтым. Подчеркнутым курсивом обозначена область интрона.

**Fig. 2. Analysis of the #MW407938.1 sequence deposited in the NCBI GenBank as the reference of the *S17* allele of *P. domestica* (according to Fernandez i Marti et al., 2021)**

The sequences of allele-specific primer are highlighted in green, consensus primer sequences are highlighted in yellow. The intron region is indicated in underlined italics.

таты полностью согласуются с описанным в литературе явлением широкого распространения самофертильных форм среди полиплоидных организмов. Считается, что функционирование системы GSI у полиплоидов значительно сложнее и может определяться многими факторами. У пасленовых полиплоидия приводит к конкурентному взаимодействию между аллелями в пыльцевом зерне и тем самым к нарушению в работе системы GSI (Golz et al., 1999), аналогичное явление показано по крайней мере для одного вида подрода *Prunophora* рода *Prunus*: *P. pseudocerasus* (Huang et al., 2008). Однако у видов под-

рода *Cerasus* рода *Prunus*, в частности у тетраплоидной вишни *P. cerasus*, потеря GSI объясняется накоплением в генотипе мутантных аллелей (Nauck et al., 2006). У сливы домашней в качестве такого мутантного аллеля был предложен аллель *S17*.

Обобщение данных молекулярного скрининга и фенотипического анализа представлено в таблице 2. Было показано, что и в случае гексаплоидной сливы, и в случае диплоидной алычи большинство самофертильных образцов не имели аллеля *S17*, то есть их самоплодность должна объясняться какими-то другими причинами. Ана-

**Таблица 2. Сопоставление результатов фенотипического анализа и молекулярного скрининга**  
Приведены данные по тем образцам, которые участвовали в обоих исследованиях

**Table 2. Comparison of phenotypic and molecular screening data**  
Data are provided only for those accessions that participated in both studies

№/ No.	Вид (число образцов)/ Species (the number of accessions)	Результаты фенотипического анализа/ Results of phenotypic analysis		Результаты молекулярного скрининга/ Results of molecular screening	
		Число (%) само- совместимых образцов/ The number (%) of self-compatible accessions	Из них – число (%) образцов с аллелем <i>S17</i> / Of these, the number (%) of samples with the <i>S17</i> allele	Число образцов с аллелем <i>S17</i> / The number of accessions with <i>S17</i> allele	Из них – число (%) само-совместимых образцов/ Of these, the number (%) of self-compatible accessions
1	<i>Prunus cerasifera</i> Ehrh. (N=67)	4 (5,9%)	1 (25%)	4	1 (25%)
2	<i>Prunus domestica</i> L. (N=57)	32 (56,1%)	4 (12,1%)	5	4 (80%)

логично, у алычи не было выявлено корреляции между присутствием аллеля *SI7* и способностью завязывать плоды при опылении своей пыльцой: из **четырёх** образцов-носителей данного аллеля самофертильным оказался только **один**. Наоборот, у *P. domestica* самосовместимыми оказались почти все образцы, имеющие в своем генотипе аллель *SI7* (см. табл. 2).

Для образцов сливы русской, сливы американской и сливы канадской не удалось выявить взаимосвязи между наличием аллеля *SI7* и способностью завязывать плоды при опылении своей пыльцой.

### Заключение

Таким образом, аллель *SI7* у сливы домашней действительно проявляет ассоциацию со свойством самосовместимости, однако у этого вида должны существовать и другие мутантные варианты, приводящие к нарушению механизмов деградации пыльцевых трубок при прорастании собственной пыльцы. Выявленные в процессе анализа самофертильные образцы, прежде всего образцы диплоидной алычи, могут представлять значительный интерес для селекции. Особенно ценными в этом плане являются самосовместимые образцы с маркерами аллеля *SI7*, поскольку их можно непосредственно использовать в маркер-вспомогательном отборе.

### References/Литература

Abdallah D., Baraket G., Ben Mustapha S., Angeles Moreno M.A., Salhi Hannachi A. Molecular and evolutionary characterization of pollen *S* determinant (*SFB* alleles) in four diploid and hexaploid plum species (*Prunus* spp.). *Biochemical Genetics*. 2021;59(1):42-61. DOI: 10.1007/s10528-020-09990-x

Abdallah D., Baraket G., Perez V., Ben Mustapha S., Salhi-Hannachi A., Hormaza J.I. Analysis of self-incompatibility and genetic diversity in diploid and hexaploid plum genotypes. *Frontiers in Plant Science*. 2019;10:896. DOI: 10.3389/fpls.2019.00896

Aguiar B., Vieira J., Cunha A.E., Fonseca N.A., Iezzoni A., van Nocker S., Vieira C.P. Convergent evolution at the gametophytic self-incompatibility system in *Malus* and *Prunus*. *PLoS ONE* 2015;10(5):e0126138. DOI: 10.1371/journal.pone.0126138

Antonova O.Yu., Klimenko N.S., Rybakov D.A., Fomina N.A., Zheltova V.V., Novikova L.Yu., Gavrilenko T.A. SSR analysis of modern Russian potato varieties using DNA samples of nomenclatural standards. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2020;3(4):77-96. [in Russian] (Антонова О.Ю., Клименко Н.С., Рыбаков Д.А., Фомина Н.А., Желтова В.В., Новикова Л.Ю., Гавриленко Т.А. SSR-анализ современных российских сортов картофеля с использованием ДНК номенклатурных стандартов. *Биотехнология и селекция растений*. 2020;3(4):77-96). DOI: 10.30901/2658-6266-2020-4-02

Bošković R., Tobutt K.R. Correlation of stylar ribonuclease isoenzymes with incompatibility alleles in sweet cherry. *Euphytica*. 1996;90(2):245-250. DOI: 10.1023/A:1003516902123

Fernandez i Marti A., Castro S., DeJong T.M., Dodd R.S. Evaluation of the *S*-locus in *Prunus domestica*, characterization, phylogeny and 3D modelling. *PLoS One*. 2021;16(5):e0251305. DOI: 10.1371/journal.pone.0251305

Golz J.F., Su V., Clarke A.E., Newbigin E. A molecular description of mutations affecting the pollen component of the *Nicotiana glauca* *S* locus. *Genetics*. 1999;152:123-1135. DOI: 10.1093/genetics/152.3.1123

Halász J., Makovics - Zsuhár N., Szöke F., Ercisli S., Hegedűs A.

Simple sequence repeat and *S*-locus genotyping to assist the genetic characterization and breeding of polyploid *Prunus* species, *P. spinosa* and *P. domestica* subsp. *insititia*. *Biochemical Genetics*. 2021;59(4):1065-1087. DOI: 10.1007/s10528-021-10090-7

Halasz J., Kurilla A., Hegedus A. Preliminary characterization of the self-incompatibility genotypes of European plum (*Prunus domestica* L.) cultivars. *International Journal of Horticultural Science*. 2014;20(3-4):23-26. DOI: 10.31421/IJHS/20/3-4/1128

Hauck N. R., Yamane H., Tao R., Iezzoni A. F. Accumulation of nonfunctional *S*-haplotypes results in the breakdown of gametophytic self-incompatibility in tetraploid *Prunus*. *Genetics*. 2006;172:1191-1198. DOI: 10.1534/genetics.105.049395

Huang S. - X., Wu H. - Q., Li Y. - R., Wu J.S. - J., Heng W., Zhang S. - L. Competitive interaction between two functional *S*-haplotypes confer self-compatibility on tetraploid Chinese cherry (*Prunus pseudocerasus* Lindl. CV. Nanjing Chuisi). *Plant Cell Reports*. 2008;27:1075-1085. DOI: 10.1007/s00299-008-0528-7

Igic B., Kohn J.R. Evolutionary relationships among self-incompatibility RNases. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2001;98(23):13167-13171. DOI: 10.1073/pnas.231386798

Inglis P.W., Pappas M.C.R., Resende L.V., Grattapaglia D. Fast and inexpensive protocols for consistent extraction of high quality DNA and RNA from challenging plant and fungal samples for high throughput SNP genotyping and sequencing applications. *PLoS ONE*. 2018;13(10):1-14. DOI: 10.17504/protocols.io.tzfp3n

Kao Th., Huang S. Gametophytic self-incompatibility: a mechanism for self/nonself discrimination during sexual reproduction. *Plant Physiology*. 1994;105(2):461-466. DOI: 10.1104/pp.105.2.461

Matsumoto D., Tao R. Distinct self-recognition in the *Prunus* S-RNase-based gametophytic self-incompatibility system. *The Horticulture Journal*. 2016a;85(4):289-305. DOI: 10.2503/hortj.MI-IR06

Matsumoto D., Tao R. Recognition of a wide-range of S-RNases by S locus F-box like 2, a general-inhibitor candidate in the *Prunus*-specific S-RNase-based self-incompatibility system. *Plant Molecular Biology*. 2016b;91(4-5):459-69. DOI: 10.1007/s11103-016-0479-2

Matsumoto D., Yamane H., Abe K., Tao R. Identification of a Skp1-like protein interacting with SFB, the pollen *S* determinant of the gametophytic self-incompatibility in *Prunus*. *Plant Physiology*. 2012;159(3):1252-1261. DOI: 10.1104/pp.112.197343

Morimoto T., Akagi T., Tao R. Evolutionary analysis of genes for S-RNase-based self-incompatibility reveals *S* locus duplications in the ancestral Rosaceae. *The Horticulture Journal*. 2015;84(3):233-242. DOI: 10.2503/hortj.mi-060

Nunes M.D., Santos R.A., Ferreira S.M., Vieira J., Vieira C.P. Variability patterns and positively selected sites at the gametophytic self-incompatibility pollen *SFB* gene in a wild self-incompatible *Prunus spinosa* (Rosaceae) population. *New Phytologist*. 2006;172(3):577-587. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2006.01838.x

Sedov E.N., Ogol'tsova T.P. (eds). Program and methodology for studying varieties of fruit, berry and nut crops (Programma i metodika sortoizucheniya plodovykh, yagodnykh i orekhoplodnykh kul'tur). Orel: Publishing House of VNIISPК; 1999. [in Russian] (Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур / под ред. Е.Н. Седова, Т.П. Огольцовой. Орел: Изд-во ВНИИСПК; 1999).

Sonneveld T., Robbins T.P., Bošković R., Tobutt K.R. Cloning of six cherry self-incompatibility alleles and development of allele-specific PCR detection. *Theoretical and Applied Genetics*. 2001;102:1046-1055. DOI: 10.1007/s001220000525

Sonneveld T., Tobutt K.R., Robbins T.P. Allele-specific PCR detection of sweet cherry self-incompatibility (*S*) alleles *SI* to *SI6* using consensus and allele-specific primers. *Theoretical and Applied Genetics*. 2003;107(6):1059-1070. DOI: 10.1007/s00122-003-1274-4

Sutherland B.G., Cerovic R., Robbons T.P., Tobutt K.R. The myrobalan (*Prunus cerasifera* L.): a useful diploid model for studying the molecular genetics of self-incompatibility in plums. *Euphytica*. 2009;166:385-398. DOI: 10.1007/s10681-008-9821-3

- Sutherland B.G., Tobutt K.R., Robbins T.P. Trans-specific *S*-RNase and *SFB* alleles in *Prunus* self-incompatibility haplotypes. *Molecular Genetics and Genomics*. 2008;279:95-106. DOI: 10.1007/s00438-007-0300-7
- Tao R., Yamane H., Sugiura A. Cloning of genomic DNA sequences encoding *S1*-, *S3*-, *S4*-, and *S6*-RNases (Accession Nos. AB031815, AB031816, AB031817 and AB031818) from sweet cherry (*Prunus avium* L.). *Plant Physiology*. 1999a;121:1057.
- Tao R., Yamane H., Sugiura A., Murayama H., Sassa H., Mori H. Molecular typing of *S*-alleles through identification, characterization and cDNA cloning for *S*-RNases in sweet cherry. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 1999b;124(3):224-233.
- Vaughan S.P., Russell K., Sargent D.J., Tobutt K.R. Isolation of *S*-locus F-box alleles in *Prunus avium* and their application in a novel method to determine self-incompatibility genotype. *Theoretical and Applied Genetics*. 2006;112:856-866. DOI: 10.1007/s00122-005-0187-9
- Vieira J., Fonseca N.A., Vieira C.P. An *S*-RNase-based gametophytic self-incompatibility system evolved only once in eudicots. *Journal of Molecular Evolution*. 2008a;67:179-190. DOI: 10.1007/s00239-008-9137-x
- Vieira J., Fonseca N.A., Vieira C.P. *RNase*-based gametophytic self-incompatibility evolution: questioning the hypothesis of multiple independent recruitments of the *S*-pollen gene. *Journal of Molecular Evolution*. 2009;69:32-41. DOI: 10.1007/s00239-009-9249-y
- Vieira J., Santos R.A., Ferreira S.M., Vieira C.P. Inferences on the number and frequency of *S*-pollen gene (*SFB*) specificities in the polyploid *Prunus spinosa*. *Heredity*. 2008b;101(4):351-358. DOI: 10.1038/hdy.2008.60
- Wright S. The distribution of self-sterility alleles in populations. *Genetics*. 1939;24:538-552.
- Wu J., Gu C., Tao R. Molecular determinants and mechanisms of gametophytic self-incompatibility in fruit trees of Rosaceae. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2013;32(1):53-68.
- Xu C., Li M., Wu J., Guo H., Li Q., Zhang Y., Chai J., Li T., Xue Y. Identification of a canonical SCF<sup>SELF</sup> complex involved in *S*-RNase-based self-incompatibility of *Pyrus* (Rosaceae). *Plant Molecular Biology*. 2013;81(3):245-257. DOI: 10.1007/s11103-012-9995-x
- Yamane H., Tao R., Sugiura A., Hauck N.R., Iezzoni A.F. Identification and characterization of *S*-RNases in tetraploid sour cherry (*Prunus cerasus*). *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 2001;126(6):661-667.
- Yushev A.A., Sorokin A.A., Tikhonova O.A., Orlova S.Yu., Kislin E.N., Radchenko O.E., Pupkova N.A., Shlyavav A.V. The collection of fruit and berry plant genetic resources: preservation, replenishment, and study: Guidelines (Kolleksiya geneticheskikh resursov plodovykh i yagodnykh rasteniy: sokhraneniye, popoleniye, izucheniye: Metodicheskiye ukazaniya). A.A. Yushev, I.G. Chukhina (eds). St. Petersburg: VIR; 2016. [in Russian] (Юшев А.А., Сорокин А.А., Тихонова О.А., Орлова С.Ю., Кислин Е.Н., Радченко О.Е., Пупкова Н.А., Шлявас А.В. Коллекция генетических ресурсов плодовых и ягодных растений: сохранение, пополнение, изучение: Методические указания / под ред. А.А. Юшева, И.Г. Чухиной. Санкт-Петербург: ВИР; 2016).
- Zhang S.L., Huang S.X., Kitashiba H., Nishio T. Identification of *S*-haplotype-specific F-box gene in Japanese plum (*Prunus salicina* Lindl.). *Sexual Plant Reproduction*. 2007;20(1):1-8. DOI: 10.1007/s00497-006-0037-1

### Информация об авторах

**Адам Капранович Макаов**, младший научный сотрудник, лаборатория молекулярной селекции и ДНК-паспортизации, отдел биотехнологии, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44, a.makaov@vir.nw.ru <https://orcid.org/0009-0006-0142-9433>

**Ольга Емельяновна Радченко**, научный сотрудник, отдел генетических ресурсов плодовых культур, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44, o.radchenko@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1712-2018>

**Александр Иванович Яремкив**, магистрант, Адыгейский государственный университет, 385000 Россия, Республика Адыгея, г. Майкоп, ул. Первомайская, 208, canka98@ya.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7313-737X>

**Ольга Юрьевна Антонова**, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующая, лаборатория молекулярной селекции и ДНК-паспортизации, отдел биотехнологии, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44, olgaant326@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8334-8069>

### Information about the authors

**Adam K. Makaov**, Junior Researcher, Laboratory of Molecular Breeding and DNA Passportization, Department of Biotechnology, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 42, 44, Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190000 Russia, a.makaov@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0009-0006-0142-9433>

**Olga E. Radchenko**, Researcher, Fruit Crop Genetic Resources Department, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 42, 44, Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190000 Russia, o.radchenko@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1712-2018>

**Alexandr I. Yaremkev**, Master's Student, Adyghe State University, 208, Pervomayskaya Street, Maikop, Republic of Adyghe, 385000 Russia, canka98@ya.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7313-737X>

**Olga Yu. Antonova**, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Head, Laboratory of Molecular Breeding and DNA Passportization, Department of Biotechnology, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 42, 44, Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190000 Russia, olgaant326@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8334-8069>

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

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

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 17.07.2025; одобрена после рецензирования 17.11.2025; принята к публикации 20.03.2026.

The article was submitted on 17.07.2025; approved after reviewing on 17.11.2025; accepted for publication on 20.03.2026.

Научная статья  
УДК 634.711:57.043  
DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-02



## Криоконсервация российских сортов малины и их долгосрочное хранение в криобанке ВИР

С. Е. Дунаева, Л. Л. Малышев, О. В. Лисицына, Т. А. Гавриленко

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

**Автор, ответственный за переписку:** Светлана Ефимовна Дунаева, [dunaevase@mail.ru](mailto:dunaevase@mail.ru)

**Актуальность.** Криоконсервация является эффективным методом долгосрочного сохранения образцов растений. Криоколлекции образцов рода *Rubus* представлены в единичных зарубежных генбанках, в которых сортов малины российской селекции практически нет. Подавляющее число работ по криоконсервации образцов рода *Rubus* основано на использовании в качестве эксплантов апексов *in vitro* растений. Коллекция *in vitro* образцов рода *Rubus* в Федеральном исследовательском центре Всероссийском институте генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР) включает 160 образцов, в их числе 79 отечественных селекционных сортов малины. Образцы малины из *in vitro* коллекции закладываются на долгосрочное хранение в криобанк ВИР с 2017 года. Задача данной работы заключалась в криоконсервации и закладке на длительное хранение 11 российских сортов из *in vitro* коллекции ВИР и обобщении данных обо всей криоколлекции сортов малины *Rubus idaeus* L., включающей в настоящее время 27 образцов, хранящихся в криобанке ВИР. **Материалы и методы.** Образцы современных сортов малины, полученные из пяти российских селекционных центров, были введены в коллекцию *in vitro* ВИР. Криоконсервацию апексов микрорастений проводили модифицированным в ВИР методом дроблет-витрификации. Для статистической обработки данных использовали дисперсионный анализ и анализ главных компонент. **Результаты и обсуждение.** В культуру *in vitro* были введены 11 сортов малины российской селекции для которых была проведена криоконсервация. Показатели посткриогенной регенерации у этих образцов варьировали от 27 до 65%. В настоящее время вся криоколлекция сортов малины, сохраняемая в криобанке ВИР, насчитывает 27 сортов с показателями посткриогенной регенерации, варьирующими от 24 до 89%. С помощью анализа главных компонент криоколлекция была разделена на группы сортов по их реакции на погружение в жидкий азот в контрольных экспериментах. **Заключение.** Криоколлекция образцов малины, хранящаяся в криобанке ВИР, была пополнена 11 сортами. В настоящее время состав криоколлекции включает 23 селекционных сорта и четыре сорта народной селекции. Все 27 сортов были заложены на долгосрочное хранение в криобанк ВИР из расчета как минимум 90 эксплантов на образец.

**Ключевые слова:** криоколлекция, *Rubus idaeus* L., селекционные сорта, коллекция *in vitro*, генбанк

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по теме № FGEM-2025-0004.

**Для цитирования:** Дунаева С.Е., Малышев Л.Л., Лисицына О.В., Гавриленко Т.А. Криоконсервация российских сортов малины и их долгосрочное хранение в криобанке ВИР. *Биотехнология и селекция растений*. 2026;9(1):38-48. DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-02

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.

© Дунаева С.Е., Малышев Л.Л., Лисицына О.В., Гавриленко Т.А., 2026

Original article

DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-o2

## Cryopreservation of Russian raspberry cultivars and their long-term storage in the VIR cryobank

Svetlana E. Dunaeva, Leonid L. Malyshev, Olga V. Lisitsyna, Tatjana A. Gavrilenko

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

**Corresponding author:** Svetlana E. Dunaeva, [dunaevase@mail.ru](mailto:dunaevase@mail.ru)

**Background.** Cryopreservation is an effective method for long-term preservation of plant specimens. Cryogenic collections of accessions of the genus *Rubus* exist in few foreign genebanks, which contain virtually no national raspberry cultivars. The overwhelming majority of studies on the cryopreservation of *Rubus* specimens are based on the use of *in vitro* plant apices as explants. The *in vitro* collection of *Rubus* accessions at the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR) comprises 160 accessions, including 79 home-bred raspberry cultivars. Long-term storage of raspberry accessions from the VIR *in vitro* collection in the VIR cryobank was initiated in 2017. The objective of this study was to arrange cryopreservation and long-term storage of 11 Russian raspberry cultivars from the VIR *in vitro* collection. This study also summarized data on the entire VIR cryo collection of raspberry, which currently includes 27 *Rubus idaeus* L. cultivars. **Materials and Methods.** Accessions of modern raspberry cultivars obtained from five Russian breeding centers were added to the VIR *in vitro* collection. Cryopreservation of microplant apices was performed using the droplet vitrification method modified at VIR. Statistical analysis of variance and principal component analysis were used for data processing. **Results and Discussion.** Eleven Russian-bred raspberry cultivars were introduced into *in vitro* culture and cryopreserved. Post-cryogenic regeneration rate for these specimens ranged from 27 to 65%. Currently, the entire cryogenic collection of raspberry cultivars preserved in the VIR cryobank comprises 27 cultivars with post-cryogenic regeneration rates ranging from 24 to 89%. Using the principal component analysis, the cultivar accessions were grouped on the basis of their response to immersion in liquid nitrogen in control experiments. **Conclusions.** The cryogenic collection of raspberry accessions in the VIR cryobank has been expanded with 11 cultivars. Currently, the cryogenic collection includes 23 released cultivars and four landraces. All 27 cultivars were placed in long-term storage in the VIR cryobank at a rate of at least 90 explants per accession.

**Keywords:** cryo collection, *Rubus idaeus* L., released cultivars, *in vitro* collection, genebank

**Acknowledgements:** the work was carried out within the framework of the State Assignment in accordance with the thematic plan of VIR, topic No. FGEM-2025-0004.

**For citation:** Dunaeva S.E., Malyshev L.L., Lisitsyna O.V., Gavrilenko T.A. Cryopreservation of Russian raspberry cultivars and their long-term storage in the VIR cryobank. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2026;9(1):38-48. DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-o2

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

© Dunaeva S.E., Malyshev L.L., Lisitsyna O.V., Gavrilenko T.A., 2026

## Введение

Евразийский вид малина обыкновенная *Rubus idaeus* L. subsp. *idaeus* относится к семейству Rosaceae и является наиболее распространенным культурным видом рода *Rubus* L. Малина – одна из наиболее экономически важных ягодных культур, выращивается более чем в 50 странах мира (Evdokimenko, Podgaetsky, 2022) и содержит широкий спектр биологически активных веществ (Egemeeva et al., 2019). Мировое производство малины в 2023 году превысило 800 тысяч тонн (FAOSTAT, 2023). Широкое генетическое разнообразие образцов культурных и диких видов малины, сохраняемое в мировых генбанках, является основой для выведения новых селекционных сортов как при использовании традиционных, так и биотехнологических подходов.

В настоящее время в Государственном реестре сортов и гибридов сельскохозяйственных растений, допущенных к использованию (State Register, 2024) числится 106 сортов малины – все отечественной селекции, созданные в следующих учреждениях: ФНЦ «Садоводство» – 51 сорт; НИИ садоводства Сибири им. М.А. Лисавенко – 13 сортов; Свердловская селекционная станция садоводства – 10; частная предпринимательская компания «Питомник Школьный сад» (Нижегородская область) – 5; Новосибирская зональная станция садоводства – 4; НИИ садоводства и лекарственных растений «Жигулевские сады» – 4; ФНЦ им. И.В. Мичурина – 3; Никитский ботанический сад – 2 сорта (State Register, 2024)<sup>1</sup>.

Генетическое разнообразие рода *Rubus* сохраняется преимущественно в полевых коллекциях, в меньшей степени дублируется в коллекциях *in vitro*, тогда как криоколлекции пока не нашли широкого распространения (Reed, 2001; Reed et al., 2011; Dunaeva et al., 2022). В то же время, криоконсервация позволяет долгосрочно хранить генетические ресурсы вегетативно размножаемых культур при сверхнизких температурах, в жидком азоте (–196°C) или в его парах (от –130 до –160°C) без риска генетических изменений, поскольку все биологические процессы в клетках в этих условиях остановлены (Reed, 2008).

Подавляющее число работ по криоконсервации образцов рода *Rubus* основано на использовании в качестве эксплантов апексов *in vitro* растений. Несмотря на то, что во многих лабораториях проводились исследования по оптимизации протоколов криоконсервации образцов *in vitro* рода *Rubus* (Vujovic et al., 2017; Edesi et al., 2020; Ma et al., 2024), программы по их долгосрочному криохранению реализуются лишь в нескольких специализирующихся на этом учреждениях, в которых функционируют криобанки. При этом необходимо отметить, что

регламенты закладки на длительное хранение в разных криобанках различаются (Приложение 1/ Supplement 1)<sup>2</sup>.

Самая крупная криоколлекция, включающая 200 образцов рода *Rubus*, находится в Национальном центре сохранения генетических ресурсов США (National Center for Genetic Resources Preservation, NCGRP), Форт Коллинз, штат Колорадо (Jenderek et al., 2025). Работы по криоконсервации образцов рода *Rubus* были начаты еще в 1990 году в Национальном хранилище клоновой зародышевой плазмы (NCGR, Корваллис, штат Орегон, США), где под руководством В.М. Reed были разработаны успешные протоколы на основе методов медленного замораживания (Reed, Lagerstedt, 1987), инкапсуляции-дегидратации (Chang, Reed, 1999) и витрификации с раствором криопротектора PVS2 (Plant Vitrification Solution 2; Sakai et al., 1990; Reed et al., 2008). Показателями эффективности разработанных протоколов являются достигнутые уровни посткриогенной регенерации – от 60 до 100%. Все протоколы включали процедуру холодового закаливания растений *in vitro* перед криоконсервацией (Reed, 1988). До 2010 года криоконсервация образцов рода *Rubus* проводилась в NCGR с отправкой сосудов Дьюара с замороженными эксплантами в криобанк NCGRP (Jenderek, Reed, 2017), где в настоящее время осуществляется весь комплекс работ по криоконсервации и хранению криоколлекции (Jenderek et al., 2025).

Из стран ближнего зарубежья в Институте биологии и биотехнологии растений Казахстана (ИББР) криоконсервацию проводили с использованием модифицированного метода витрификации (Kovalchuk et al., 2010); на хранение в криобанк заложены 25 образцов, включающие сорта, гибриды и клоны дикорастущих видов рода *Rubus* (Turdiyev et al., 2024). Метод дроплет-витрификации (droplet vitrification, DV), разработанный Б. Панисом (Panis et al., 2005), широко и успешно применяется для разных видов растений, включая представителей рода *Rubus*. В работе с генетически разнообразным материалом видов этого рода используются разные модификации метода (Nukari et al., 2009; Condello et al., 2011; Vujović et al., 2011; Vujović et al., 2017; Ukhatova et al., 2017; Tuohimetsä, Nukari, 2019; Edesi et al., 2020; Jenderek et al., 2025); ряд протоколов, применяемых для криоконсервации сортов малины, приведен в приложении (Приложение 2/ Supplement 2).

В Западной Европе с использованием модифицированного метода DV была проведена криоконсервация образцов малины, которые хранятся в криобанке Финляндии Laukaa Cryobank (Nukari et al., 2011) – 32 образца и в Институте биоэкономических исследований в Норвегии (Norwegian Institute of Bioeconomy Research, NIBIO, Sagaplant) – 23 образца (Ma et al., 2024).

<sup>1</sup> Примечание: ряд учреждений с единичными сортами, зарегистрированными в Госреестре, здесь не приводится (см. State Register, 2024)/ Note: a number of institutions with single cultivars registered in the State Register are not listed here (see State Register, 2024)

<sup>2</sup> Приложения доступны в онлайн версии статьи/ The supplements are available in the online version of the paper: DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-02

В России первые образцы малины были криоконсервированы методами медленного и быстрого замораживания в Институте физиологии растений Российской академии наук им. К.А. Тимирязева РАН (ИФР РАН); в криобанке этого института хранятся два сорта: ‘Скромница’ и ‘Ласточка’, а также четыре мериклона малины (Vysotskaya et al., 1999; Yuorieva et al., 2023).

В ВИР работы по криоконсервации *in vitro* образцов малины были начаты в 2017 году с использованием метода DV. Коллекция *in vitro* образцов рода *Rubus* в ВИР включает 160 образцов, в их числе 98 селекционных сортов малины, из которых 79 отечественной селекции. Ранее для 16 отечественных сортов из коллекции *in vitro* ВИР была проведена криоконсервация и закладка их на длительное хранение в криобанк ВИР (Ukhatova et al., 2017; Kamnev et al., 2022).

В данной статье представлены результаты криоконсервации 11 современных российских сортов из *in vitro* коллекции ВИР, приведен состав всей криоколлекции малины, насчитывающей в настоящее время 27 образцов, и обобщены данные их посткриогенной регенерации.

## Материалы и методы

**Растительный материал.** Образцы 11 сортов малины были переданы в ВИР из пяти селекционных центров РФ авторами сортов или официальными представителями селекционных центров – специалистами по культуре для пополнения полевой, *in vitro* и крио коллекций ВИР. После закрепления этих образцов в полевой коллекций Пушкинских лабораторий ВИР, им были присвоены интродукционные номера: ‘Алая россыпь’ (и:о-635696), ‘Антарес’ (и:о-635697), ‘Арочная’ (и:о-633935), ‘Атлант’ (и:о-642072), ‘Зоренька Алтая’ (и:о-638076), ‘Кассиопея’ (и:о-633940), ‘Иллюзия’ (и:о-640733), ‘Муза’ (и:о-635701), ‘Прелесть’ (и:о-633937), ‘Рубиновая’ (и:о-63941), ‘Суламифь’ (и:о-638079). Подробная информация об этих 11 сортах представлена в Приложении 3 (и:о- префикс к номеру отечественного сорта; Приложение 3/ Supplement 3). Кроме того, в исследовании были привлечены данные о частоте посткриогенной регенерации 16 сортов малины, криоконсервация которых была проведена нами ранее (Ukhatova et al., 2017; Kamnev et al., 2022); данные об этих 16 сортах приведены в Приложении 4 (Приложение 4/ Supplement 4).

**Введение образцов в культуру *in vitro*.** Подробные протоколы выбора инициальных эксплантов (пазушных почек) и режима стерилизации для введения образцов малины в культуру *in vitro*, а также условия микроразмножения, укоренения развития микрорастений и тестирования растительного материала на наличие внутренних бактериальных инфекций изложены в Методических указаниях ВИР (Dunaeva et al., 2017). Здесь приведем лишь краткое описание основных этапов работы и составы питательных сред.

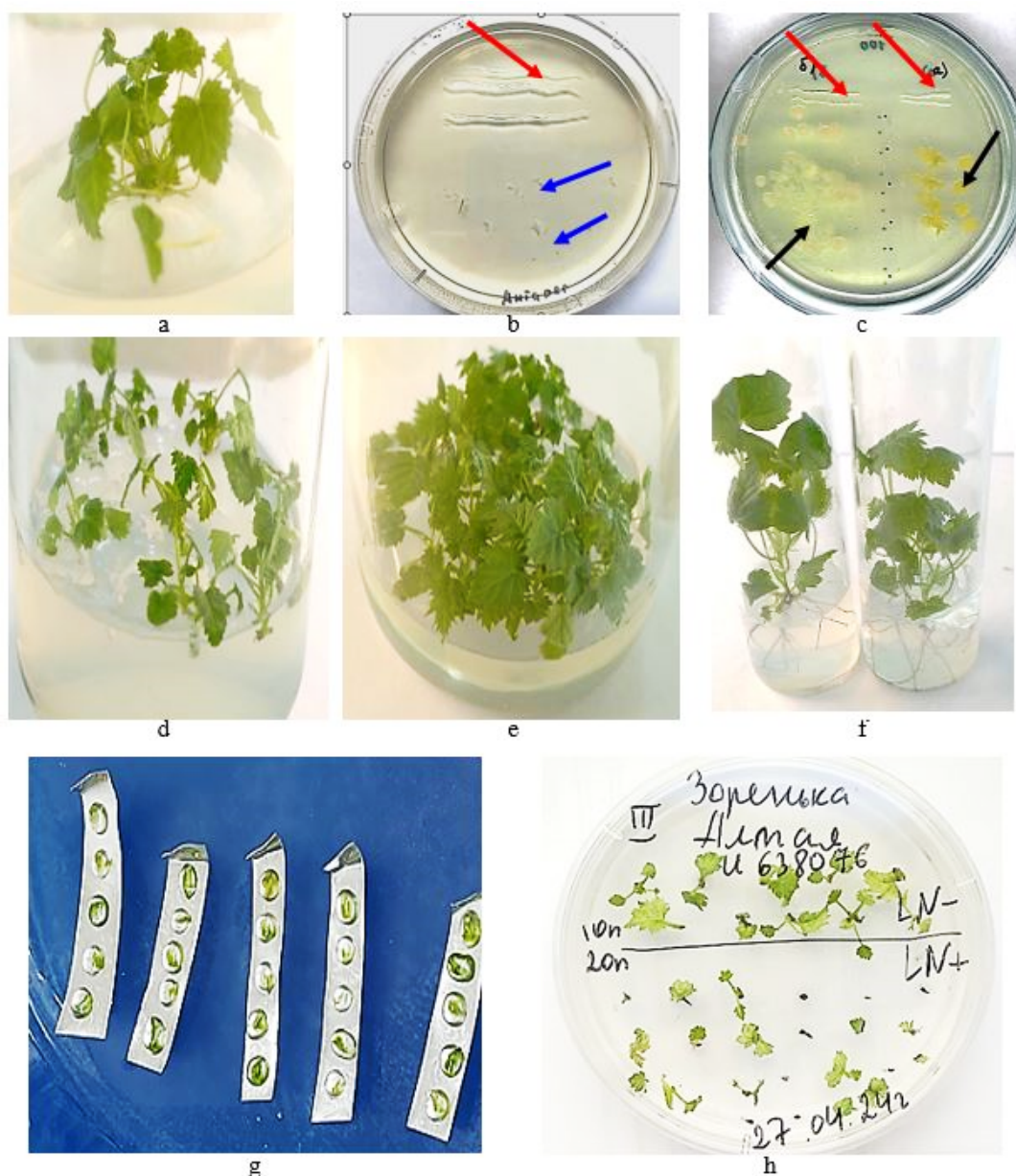
У растений из полевой коллекции ВИР отбирали пазушные почки и высаживали их на питательную сре-

ду Мурасиге и Скуга (MS) (Murashige, Skoog, 1962), дополненную 6-бензиламинопурином (6 БАП) – 0,5 мг/л, индолил- 3- масляной кислотой (ИМК) – 0,1 мг/л, гибберелловой кислотой (ГК) – 0,1 мг/л, аскорбиновой кислотой – 2 мг/л, сахарозой – 30 г/л и агаром – 7 г/л. Пазушные побеги, сформировавшиеся на введенных в культуру *in vitro* почках, так называемые «розетки», тестировали на наличие внутренних (скрытых или эндофитных) бактериальных инфекций на твердой бактериальной среде (Viss et al., 1984). «Розетки» без выявленной бактериальной контаминации разделяли на отдельные микророзетки, часть из которых использовали для микроразмножения. Оставшиеся побеги укореняли на безгормональной питательной среде MS и сформировавшиеся микрорастения включали в активную коллекцию *in vitro*, поддержание которой обеспечивается регулярным черенкованием с интервалом в три месяца.

Для получения необходимого числа апексов для криоконсервации проводили два субкультивирования растительного материала с интервалом 4-5 недель на питательной среде MS, дополненной 6- БАП (0,5 мг/л), ИМК (0,1 мг/л), ГК (0,1 мг/л), сахарозой (30 г/л) и агаром (7 г/л). Растительный материал в культуре *in vitro* поддерживали при температуре 22-23°C, фотопериоде 16 часов и интенсивности светового потока 40 мкмоль м<sup>2</sup> с<sup>-1</sup>.

**Криоконсервация апексов побегов *in vitro* растений.** Криоконсервацию проводили с использованием метода капель-витрификации (DV), отдельные этапы которого были модифицированы в отделе биотехнологии ВИР (Dunaeva et al., 2017; Ukhatova et al., 2017; Gavrilenko et al., 2019) (см. Приложение 1, 2/ see Supplements 1, 2). Составы растворов для криоконсервации эксплантов и их оттаивания, а также для посткриогенной регенерации приведены в Приложении 2 (см. Приложение 2/ see Supplement 2). Протокол криоконсервации включал следующие последовательные этапы: (а) изоляцию апексов микрорастений и обработку их растворами с криопротекторами, (б) криоконсервацию – погружение эксплантов в жидкий азот (LN), (в) оттаивание, (г) посткриогенное восстановление и оценку регенерационной способности образцов в двух контрольных вариантах: ‘+LN’ – с погружением эксплантов на один час в жидкий азот с последующим оттаиванием для контроля уровня посткриогенной регенерационной способности, и ‘-LN’ – без погружения эксплантов в жидкий азот для контроля качества используемых растворов с криопротекторами и питательных сред; (д) закладка криоконсервированных эксплантов на длительное хранение в криобанк.

Регламент проведения контрольных опытов и закладки образцов малины на длительное хранение в криобанк ВИР приведен в Приложении 1 (см. Приложение 1/ see Supplement 1). Для каждого образца эксперименты выполняли в трех независимых повторностях. В каждой повторности изолировали по 60 эксплантов, из них 20 использовали в контрольном варианте ‘+LN’, 10 – в контрольном варианте ‘-LN’, оставшиеся 30 криоконсервированных



**Рис. 1. Основные этапы экспериментов по подготовке растительного материала, его криоконсервации и оценке регенерационной способности**

- (a) «розетка» побегов, используемая для тестирования на бактериальные инфекции; (b, c) результаты тестирования на наличие скрытых бактериальных инфекций которые не выявлены (b) или обнаружены (c) в проверяемом растительном материале; красные стрелки указывают на следы, сделанные инструментами на питательной среде, синие стрелки – на следы аппликации «розеток» побегов, черные стрелки – на выявленную бактериальную инфекцию; (d) культивирование микропобегов, отделенных от «розеток»; (e) микроразмножение; (f) микрорастения в коллекции *in vitro*; (g) апексы в каплях криопротектора на полосках алюминиевой фольги перед погружением в жидкий азот; (h) регенерация эксплантов в контрольных вариантах ‘-LN’ и ‘+LN’ у сорта ‘Зоренька Алтая’ (и:о-638076)

**Fig. 1. Main stages of the experiments on the preparation of plant material, its cryopreservation and assessment of regenerative capacity**

- (a) rosette of shoots used for testing for bacterial infections; (b, c) results of testing for the presence of latent bacterial infections that were not detected (b) or detected (c) in the tested plant material; red arrows point to traces left by tools on the nutrient medium, blue arrows point to traces of application of the rosette of shoots, black arrows point to the detected bacterial infection; (d) cultivation of microshoots separated from the rosettes; (e) micropropagation; (f) microplants in an *in vitro* collection; (g) apexes in drops of cryoprotectant on aluminum foil strips before immersion in liquid nitrogen; (h) regeneration of explants in the control variants ‘-LN’ and ‘+LN’ in the cultivar ‘Zoren’ka Altaya’ (и:о-638076).

эксплантов передавали на длительное хранение в криобанк ВИР. Таким образом, для криоконсервации и закладки на криохранилище одного образца вычленили 180 эксплантов.

Статистическую обработку данных проводили с использованием пакета Statistica 10.0. Статистическая обработка включала дисперсионный анализ:

- однофакторный с одним источником варьирования – «генотип (сорт)» в каждом варианте опыта;
- двухфакторный с двумя источниками варьирования (факторами):

(1) «вариант опыта» – '+LN' (с кратковременным погружением в жидкий азот) и '-LN' (без обработки жидким азотом), и (2) «генотип (сорт)». По результатам дисперсионного анализа вычислена доля влияния факторов и их взаимодействия  $\eta_{i(j,ij)}^2$  и неучтенных факторов (ошибки)  $\eta_e^2$ :

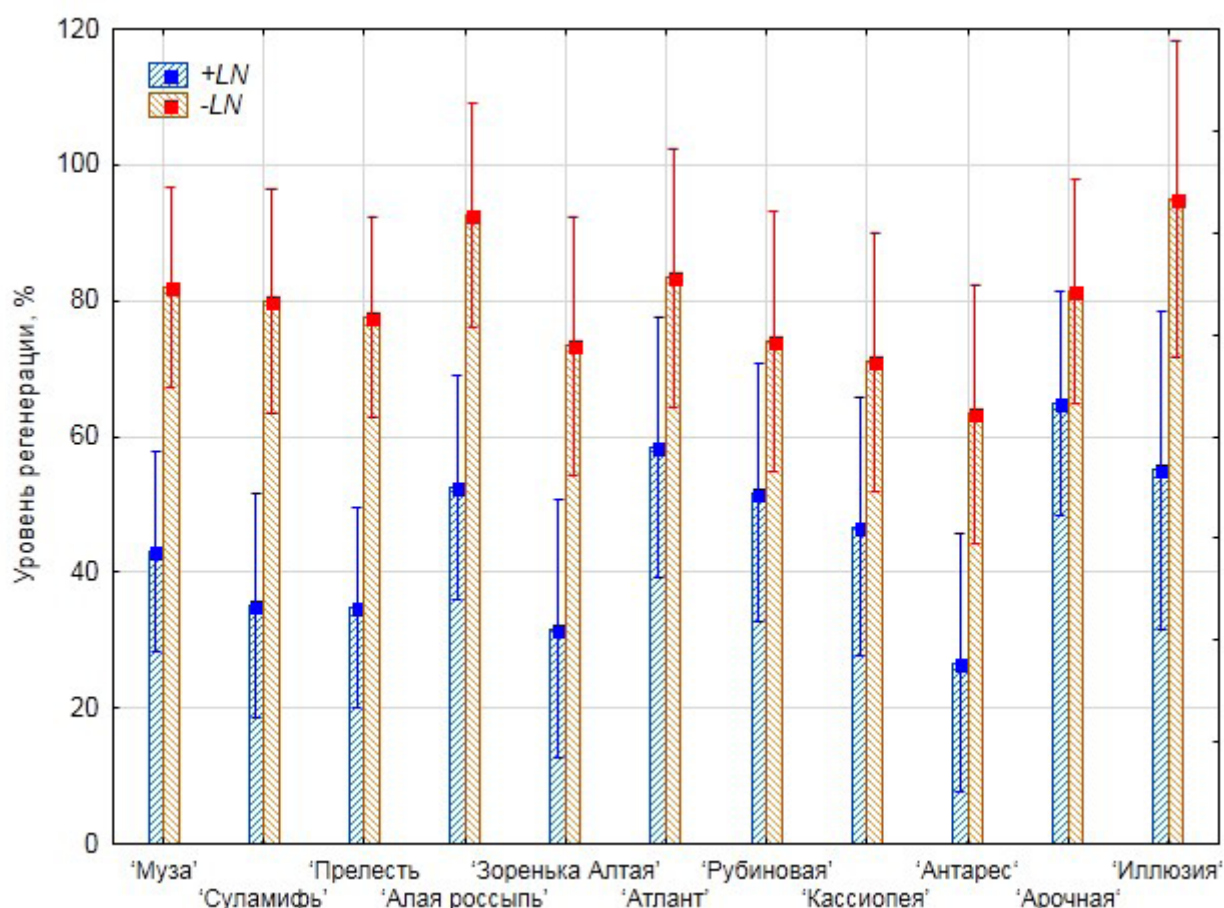
$$\eta_i^2 = \frac{SS_i}{SS} \text{ и } \eta_e^2 = \frac{SS_e}{SS},$$

где  $SS_{i(j,ij)}$  – сумма квадратов отклонений по первому ( $i$ ) и второму ( $j$ ) фактору и взаимодействию между факторами ( $ij$ ),  $SS_e$  – сумма квадратов отклонений ошибки (неучтенных факторов) и  $SS$  – общая сумма квадратов отклонений.

Для группировки изученных образцов по изменению уровня регенерационной способности в ответ на кратковременное, один час, погружение в жидкий азот был использован анализ главных компонент.

## Результаты и обсуждение

**Криоконсервация 11 сортов малины из *in vitro* коллекции ВИР.** Для криоконсервации были отобраны сорта малины, созданные в пяти селекционных учреждениях РФ, из коллекции *in vitro* ВИР (см. Приложение 3/ see Supplement 3). На рисунке 1 а-г представлены основные этапы подготовки растительного материала, его криоконсервации и оценке регенерационной способности.



**Рис. 2. Уровень регенерации апексов 11 сортов малины в контрольных вариантах опыта '+LN' (■) и '-LN' (■)**

**Fig 2. The level of regeneration of apices of 11 raspberry cultivars in the control experiments '+LN' (■) and '-LN' (■)**

Одним из важных этапов в работах по криоконсервации является тестирование растительного материала на отсутствие скрытых бактериальных инфекций (см. рис. 1b, c)), поскольку они могут угнетать микро-размножение побегов (Dunaeva, Osledkin, 2015). Вторым значимым этапом является микро-размножение (см. рис. 1d, e), так как необходимо получить как минимум 180 апексов (верхушечных почек) для криоконсервации каждого образца (см. Приложение 1/ see Supplement 1). На рисунке 2 приведены данные по уровню регенерации апексов микрорастений 11 сортов малины в двух контрольных вариантах: ‘-LN’ (без погружения эксплантов в жидкий азот) и ‘+LN’ (с погружением эксплантов в жидкий азот на один час).

В варианте ‘-LN’ уровень регенерации варьировал от 63,3±8,8% у сорта ‘Антарес’ до 92,5±2,5% у сорта ‘Алая россыпь’, а в варианте ‘+LN’, уровень посткриогенной регенерации варьировал от 26,7±1,7% у сорта ‘Антарес’ до 65,0±8,9% у сорта ‘Арочная’ (см. рис. 2). Коэффициент корреляции между уровнем регенерации в контрольных вариантах ‘-LN’ и ‘+LN’ указывал на умеренную положительную связь и был в высокой степени достоверен ( $r=0,551$ ,  $p=0,001$ ).

Влияние генотипа, рассчитанное отдельно в варианте ‘-LN’ и в варианте ‘+LN’, было недостоверным ( $p=0,580$ , доля влияния  $\eta^2=30,7\%$  и  $p=0,154$ , доля влияния  $\eta^2=36,5\%$  соответственно).

В двухфакторном дисперсионном комплексе вариант опыта имел достоверное влияние на регенерацию эксплантов ( $p=0,001$ , доля влияния  $\eta^2=49,1\%$ ). Значение уровня регенерации у 11 сортов в варианте опыта ‘-LN’ было ожидаемо выше и составило 79,9±2,4%, в то время как в варианте ‘+LN’ оно составило 45,0±3,1%. Взаимодействие факторов “генотип” и “вариант опыта” было недостоверным ( $p=0,726$ ,  $\eta^2=4,3\%$ ). Значительную долю влияния на регенерацию в обоих вариантах опыта ‘-LN’ и ‘+LN’ оказывали неучтенные факторы.

**Инвентаризация криоколлекции сортов малины ВИР.** По результатам проведенной работы в криобанк ВИР были заложены 11 новых сортов малины. В результате суммарный состав криоколлекции этой культуры увеличился до 27 образцов (рис. 3, см. Приложение 4/ see Supplement 4). Состав криоколлекции образцов малины включает 23 отечественных селекционных сорта и четыре сорта народной селекции. Каждый из 27 образцов малины был представлен как минимум девятью криопробирками с 10 эксплантами в каждой, в сумме – не менее 90 эксплантов на образец.

В Приложении 4 (см. Приложение 4/ see Supplement 4) для каждого из 27 образцов приведены данные по уровню регенерации в контрольных вариантах ‘-LN’ и ‘+LN’, между этими показателями получена достоверная положительная связь ( $r=0,551$ ,  $p=0,001$ ). На рисунке 3 представлено варьирование уровня посткриогенной регенерации в выборке из 27 сортов, хранящихся в криобанке ВИР.

Международная организация по сохранению биоразнообразия (IPGRI) рекомендовала сохранять в криобанках образцы с минимальным уровнем посткриогенной регенерации (‘+LN’) не менее 20% (Engelmann, Takagi, 2000). В дальнейшем, с совершенствованием методов криоконсервации, этот пороговый уровень повышался. Так, Dussert с соавторами (Dussert et al., 2003) на основе статистических расчетов рекомендовали закладывать в криобанк образцы с уровнем посткриогенной регенерации не менее 39%, что, по расчетам авторов, должно соответствовать компромиссу между возможностью восстановления образца после длительного криохранения и числом заложённых в криобанк эксплантов.

В публикации Volk с соавторами (Volk et al., 2017) приводится расчетная таблица, позволяющая на основе двух показателей (число заложённых в криобанк апексов и средний уровень их посткриогенной регенерации в контроле ‘+LN’) прогнозировать с высокой вероятностью (0,95) число жизнеспособных апексов, которые можно извлечь из криобанка в случае определённого образца. В каждом криобанке принимаются такие решения самостоятельно с учетом стоимости работ и необходимости обеспечения жизнеспособности дублетных коллекций (Volk et al., 2017), поэтому регламенты закладки в разных криобанках отличаются (см. Приложение 1/ see Supplement 1).

Уровень посткриогенной регенерации 27 образцов криоколлекции малины, хранящихся в криобанке ВИР, варьирует от 24 до 89% (см. рис. 3; см. Приложение 4/ see Supplement 4); из них рекомендованный уровень 39% и выше имеют 16 сортов малины (в приложении 4 эти образцы отмечены\*/ in Supplement 4 these accessions are marked with\*). Согласно рекомендациям (Dussert et al., 2003; Volk et al., 2017) при низких значениях регенерации, менее 39%, обусловленных генотипическими особенностями образца, число заложённых на длительное хранение в криобанк эксплантов должно быть увеличено (до более 90) или требуется модификация протокола для этого образца.

**Дифференциация образцов криоколлекции малины по реакции на кратковременное погружение в жидкий азот.** На следующем этапе были обобщены данные по реакции на кратковременное, на один час, погружение в жидкий азот у образцов расширенной выборки, включающей 11 сортов малины, данное исследование, и 16 сортов, криоконсервация которых была проведена ранее (Ukhatova et al., 2017; Kamnev et al., 2022). Образцы были сгруппированы по степени снижения регенерационной способности в контрольном варианте ‘+LN’ в сравнении с соответствующим показателем в варианте ‘-LN’.

Для выявления различий между генотипами использовали анализ главных компонент, по результатам которого были выделены два фактора: с фактором 1 (80,9% дисперсии) связан средний уровень регенерации в обоих вариантах (‘-LN’ и ‘+LN’) и с фактором 2 (19,0%) – специ-

фическая реакция сорта на кратковременное погружение апексов в жидкий азот (степень снижения уровня регенерации). На основе полученных результатов выборка из 27 сортов может быть разделена на четыре группы по

их реакции на кратковременное, на один час, погружение в жидкий азот. На рисунке 4 эти группы обозначены как 1-4 и цифрой 5 отмечен один сорт 'Скромница'.

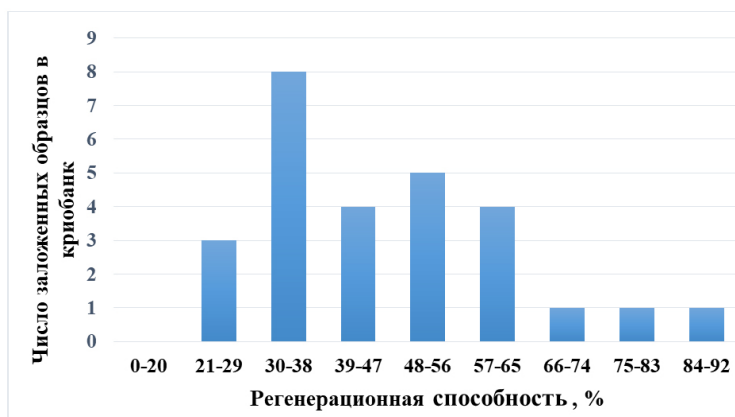


Рис. 3. Средние значения частот посткриогенной регенерации в контрольном варианте '+LN' у 27 сортов малины из криоколлекции ВИР

Fig. 3. Average frequencies of post-cryogenic regeneration in '+LN' control variant for 27 raspberry cultivars from the VIR cryogenic collection

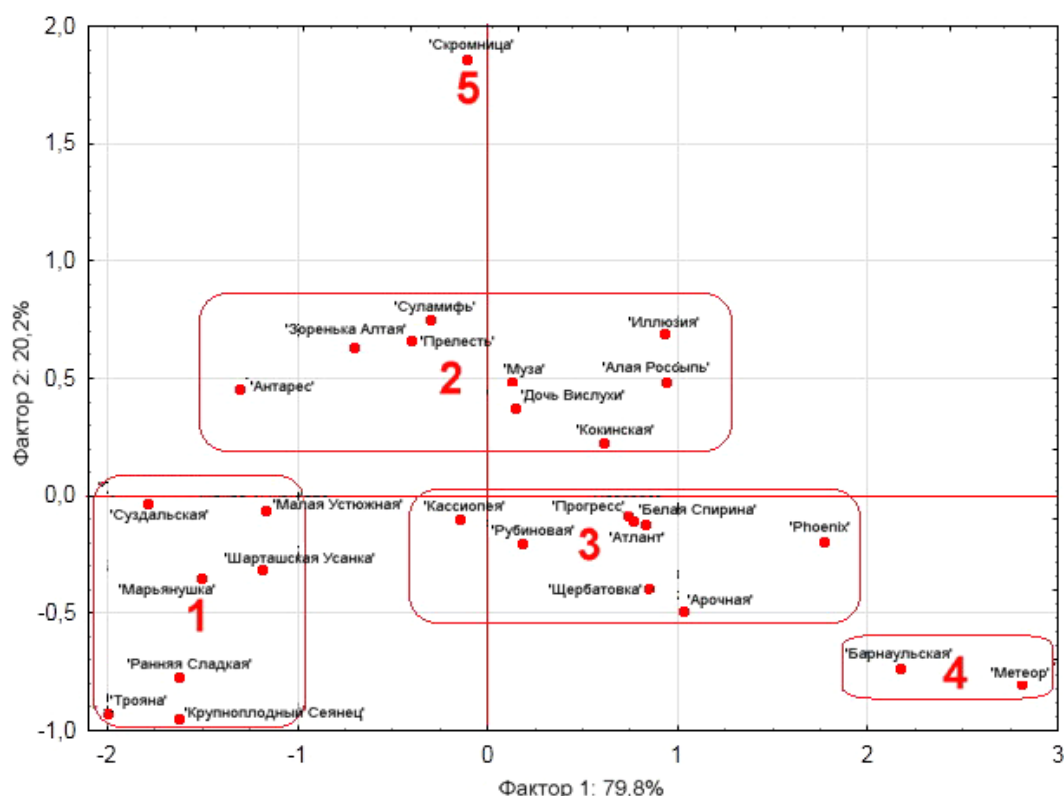


Рис. 4. Дифференциация 27 сортов малины в пространстве факторов 1 и 2 по реакции на кратковременное погружение в жидкий азот (1 час)

Fig. 4. Differentiation of 27 raspberry cultivars in space of factors 1 and 2 based on response to short-term immersion in liquid nitrogen (1 hour)

Группа 1 включала семь сортов: 'Крупноплодный сеянец', 'Малая Устюжная', 'Марьянушка', 'Ранняя сладкая', 'Суздальская', 'Трояна', 'Шарташская Усанка' (см. рис. 4), регенерационная способность которых в контрольном варианте '-LN' варьировала от 36,6 до 58,5%, среднее значение составляло  $47,8 \pm 3,0\%$ . В контрольном варианте '+LN' показатели посткриогенной регенерации сортов группы 1 варьировали от 26,7 до 39,3% со средним значением  $34,7 \pm 1,5\%$ . Таким образом, сорта этой группы характеризовались низким или средним уровнем регенерации в варианте '-LN', а в варианте '+LN' уровень регенерации снижался слабо.

Группа 2 включала девять сортов: 'Алая россыпь', 'Антарес', 'Дочь Вислухи', 'Зоренька Алтай', 'Иллюзия', 'Муза', 'Прелесть', 'Суламифь', 'Кокинская', у которых уровень регенерации в варианте '-LN' был относительно высоким, варьирование от 63,8 до 92,5% со средним значением  $81,1 \pm 3,2\%$ , и в варианте '+LN' уровень регенерации снижался сильно, варьирование от 26,7 до 52,5%, среднее значение  $41,1 \pm 3,1$ .

Группа 3 включала восемь сортов: 'Phoenix', 'Арочная', 'Атлант', 'Белая Спирина', 'Кассиопея', 'Прогресс', 'Рубиновая', 'Щербатовка' (см. рис. 4), у которых уровень регенерации в варианте '+LN' снижался средне. В варианте '-LN' уровень регенерации сортов этой группы варьировал от 71,1 до 83,3%, средний уровень составлял  $81,1 \pm 2,4\%$ ; в варианте '+LN' уровень посткриогенной регенерации варьировал от 46,7 до 70,1%, среднее значение составляло  $58,4 \pm 2,6\%$ .

Группа 4 включала два сорта: 'Барнаульская' и 'Метеор' с высоким уровнем регенерации в варианте '-LN'. В варианте '+LN' уровень посткриогенной регенерации у этих сортов снижался слабо. Так, в контрольном варианте '-LN' частота регенерации у сортов группы 4 варьировала от 92,6 до 100%, средний уровень –  $96,3 \pm 3,7$ . В варианте '+LN' частота посткриогенной регенерации снижалась незначительно: у сорта 'Барнаульская' до 81,1%, а у сорта 'Метеор' до 89,3%. Средний уровень регенерации апексов после воздействия жидкого азота составлял  $85,2 \pm 4,1\%$ .

Сорт малины 'Скромница' (номер 5, см. рис. 4) выделялся высоким уровнем регенерации в варианте '-LN' (96,7%), но при помещении в жидкий азот (в варианте '+LN') уровень регенерации у этого сорта снижался очень сильно до  $24,2 \pm 5,6\%$ .

## Заключение

В культуру *in vitro* было введено 11 образцов российских сортов малины, которые в результате проведенной работы включены в *in vitro* коллекцию ВИР. После микро-размножения апексы микропобегов этих сортов были использованы для криоконсервации. В настоящее время состав криоколлекции сортов малины, сохраняемой в криобанке ВИР, включает 27 образцов, уровень посткриогенной регенерации которых в варианте '+LN' варьи-

рует от 24 до 89%. Результаты анализа главных компонент позволили разделить 27 сортов малины на группы по их реакции на кратковременное погружение в жидкий азот. Все 27 образцов заложены на долгосрочное хранение в криобанк ВИР из расчета как минимум 90 экзплантов на образец, размещенных в девяти криопробирках.

## References/Литература

- Chang Y., Reed B.M. Extended cold acclimation and recovery medium alteration improve regrowth of *Rubus* shoot tips following cryopreservation. *CryoLetters*. 1999;20:371-376.
- Condello E., Růžic D., Panis B., Caboni E. Raspberry cryopreservation by droplet vitrification technique. *Acta Horticulture*. 2011;918:965-969. DOI: 10.17660/Acta Hort.2011.918.127
- Dunaeva S.E., Krasovskaya L.S., Gavrilenko T.A. *Ex situ* conservation of biological resources of the genus *Rubus* (Rosaceae). *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2022;183(1):236-253. [in Russian] (Дунаева С.Е., Красовская Л.С., Гавриленко Т.А. Сохранение генетических ресурсов рода *Rubus* (Rosaceae) *ex situ*. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2022;183(1):236-253). DOI: 10.30901/2227-8834-2022-1-236-253
- Dunaeva S.E., Osledkin Yu.S. Bacterial microorganisms associated with the plant tissues culture: identification and possible role. *Agricultural biology*. 2015;50(1):3-15. [in Russian] (Дунаева С.Е., Оследкин Ю.С. Бактериальные микроорганизмы, ассоциированные с тканями растений в культуре *in vitro*: идентификация и возможная роль. *Сельскохозяйственная биология*. 2015;50(1):3-15).
- Dunaeva S.E., Pendinen G.I., Antonova O.Y., Shvachko N.A., Ukhatoeva Yu.V., Shuvalova L.E., Volkova N.N., Gavrilenko T.A. Preservation of vegetatively propagated crops in *in vitro* and cryo-collections: methodological guidelines. (Sokhraneniye vegetativno razmnozhayemykh kul'tur v *in vitro* i krio kollekttsiyakh: metodicheskiye ukazaniya). T.A. Gavrilenko (ed.). 2<sup>nd</sup> ed. St. Petersburg: VIR; 2017. [in Russian] (Дунаева С.Е., Пендинен Г.И., Антонова О.Ю., Швачко Н.А., Ухатова Ю.В., Шувалова Л.Е., Волкова Н.Н., Гавриленко Т.А. Сохранение вегетативно размножаемых культур в *in vitro* и крио коллекциях: методические указания / под ред. Т.А. Гавриленко. 2-е изд. Санкт-Петербург: ВИР; 2017).
- Dussert S., Engelmann F., Noiroit M. Development of probabilistic tools to assist in the establishment and management of cryopreserved plant germplasm collections. *CryoLetters*. 2003;24(3):149-160.
- Edesi J., Tolonen J., Ruotsalainen A.L., Aspi J., Häggman H. Cryopreservation enables long-term conservation of critically endangered species *Rubus humulifolius*. *Biodiversity and Conservation*. 2020;29(1):303-314. DOI: 10.1007/s10531-019-01883-9
- Eremeeva N.B., Makarova N.V., Zhidkova E.M., Maximova V.P., Lesova E.A. Ultrasonic and microwave activation of raspberry extract: antioxidant and anti-carcinogenic properties. *Foods and Raw Materials*. 2019;7(2):264-273. DOI: 10.21603/2308-4057-2019-2-264-273
- Evdokimenko S.N., Podgaetsky M.A. State of raspberry assortment in Russia and problems of its improvement. *Pomiculture and small fruits culture in Russia*. 2019;59:294-300. [in Russian] (Евдокименко С.Н., Подгаецкий М.А. Состояние сортимента малины в России и проблемы его улучшения. *Плодоводство и ягодоводство России*. 2019;59:294-300). DOI: 10.31676/2073-4948-2019-59-294-300
- Gavrilenko T.A., Shvachko N.A., Volkova N.N., Ukhatoeva Yu.V. A modified droplet vitrification method for cryopreservation of shoot tips from *in vitro* potato plants. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2019;23(4):422-429. [in Russian] (Гавриленко Т.А., Швачко Н.А., Волкова Н.Н., Ухатова Ю.В. Модифицированный метод капель-витрификации для криоконсервации апексов *in vitro* растений картофеля. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2019;23(4):422-429). DOI: 10.18699/VJ19.505

- Engelmann F., Takagi H. (eds) Cryopreservation of tropical plant germplasm. Current research progress and applications. IPGRI; 2000.
- FAOSTAT. The Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2023. Available from: [https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries\\_by\\_commodity](https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity) [accessed Nov. 15, 2025]
- Jenderek M.M., Ambruzs B.D., Yeater K.M., Reed B.M. Evaluating shoot-tip regrowth of 25 *Rubus* L. species and hybrids after 15 to 20 years of cryopreserved storage. *Cryobiology*. 2025;118:105159. DOI: 10.1016/j.cryobiol.2024.105159
- Jenderek M.M., Reed B.M. Cryopreserved storage of clonal germplasm in the USDA National Plant Germplasm System. *In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant*. 2017;53(4):299-308. DOI: 10.1007/s11627-017-9828-3
- Kamnev A.M., Dunaeva S.E., Volkova N.N., Lisitsyna O.V., Gavrilenko T.A. Cryopreservation of raspberry cultivar accessions bred in Russia from the VIR *in vitro* collection. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2022;5(1):17-27. [in Russian] (Камнев А.М., Дунаева С.Е., Волкова Н.Н., Лисицына О.В., Гавриленко Т.А. Криоконсервация образцов сортов малины отечественной селекции из *in vitro* коллекции ВИР. *Биотехнология и селекция растений*. 2022;5(1):17-27). DOI: 10.30901/2658-6266-2022-1-02
- Kovalchuk I., Turdiev T., Kushnarenko S., Rakhimbaev I., Reed B.M. Cryopreservation of raspberry cultivars: testing techniques for long-term storage of Kazakhstan's plant germplasm. *The Asian and Australasian Journal of Plant Science and Biotechnology*. 2010;4(1):1-4.
- Ma X.Y., Blystad D., Wang Q.C., Tong L., Stensbøl Ø., Zhang D., Hamborg Z. Establishment of an efficient and wide-spectrum droplet-vitrification cryopreservation for raspberry (*Rubus idaeus* L.) germplasm and assessments of genetic integrity and vegetative growth in the regenerants. *Plant Cell Tissue Organ Culture*. 2024;159(3):58. DOI: 10.1007/s11240-024-02919-x
- Murashige T., Skoog F. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*. 1962;15:473-497. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x
- Nukari A., Uosukainen M., Laamanen J., Rantala S. Cryopreservation of horticultural plants at MTT. In: A. Grapin, E.R.J. Keller, P.T. Lynch, B. Panis, A. Revilla Bahillo, F. Engelmann (eds). *Cryopreservation of crop species in Europe : COST Action 871 : CryoPlanet : Proceeding of the final meeting; 2011 February 08-11; Angers, France*. Brussels: COST; 2011. p.93-97.
- Nukari A., Uosukainen M., Rokka V.M., Antonius K., Wang Q., Valkonen J.P.T., Cryopreservation techniques and their application in vegetatively propagated crop plants in Finland. *Agricultural and Food Science*. 2009;18:117-128. DOI: journal.fi/afs/article/view/5941/53139
- Panis B., Piette B., Swennen R. Droplet vitrification of apical meristems: a cryopreservation protocol applicable to all *Musaceae*. *Plant Science*. 2005;168:45-55. DOI: 10.1016/j.plantsci.2004.07.022
- Reed B.M. Cold acclimation as a method to improve survival of cryopreserved *Rubus* meristems. *CryoLetters*. 1988;9:166-171.
- Reed B.M. Implementing cryogenic storage of clonally propagated plants. *CryoLetters*. 2001;22:97-104.
- Reed B.M. Cryopreservation of temperate berry crops. In: B.M. Reed (ed.). *Plant cryopreservation: A practical guide*. New York: Springer; 2008. p.333-364.
- Reed B.M., Hummer K.E., Gupta S., Chang Y., Medium and long-term storage of *Rubus* germplasm. *Acta Horticulture*. 2008;777:91-97.
- Reed B.M., Lagerstedt H.B. Freeze preservation of apical meristems of *Rubus* in liquid nitrogen. *HortScience*. 1987;22:302-303.
- Reed B.M., Sarasan V., Kane M., Bunn E., Pence V.C. Biodiversity conservation and conservation biotechnology tools. *In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant*. 2011;47:1-4. DOI: 10.1007/s11627-010-9337-0
- Sakai A., Kobayashi S., Oiyama I. Cryopreservation of nucellar cells of navel orange (*Citrus sinensis* Osb. var. *brasiliensis* Tanaka) by vitrification. *Plant Cell Reports*. 1990;9(1):30-33. DOI: 10.1007/bf00232130
- State Register of varieties and hybrids of agricultural plants admitted for usage (National List): official publication. Moscow: Rosinformagrotech; 2024. [in Russian] (Государственный реестр сортов и гибридов сельскохозяйственных растений, допущенных к использованию: официальное издание. Москва: Росинформагротех; 2024). URL: <https://gossortrf.ru/upload/iblock/00a/clri6obhduexq6t1f6awcrsp6vm6psk.pdf> [дата обращения: 15.12.2025].
- Tuohimetsä S., Nukari A. Modified droplet-vitrification cryopreservation of arctic bramble (*Rubus arcticus*) and hybrid arctic bramble. *Acta Horticulture*. 2019;1234:225-232. DOI: 10.17660/ActaHortic.2019.1234.30
- Turdiyev T., Kovalchuk I., Mukhitdinova Z., Hunger O., Frolov S., Kabyzbekova B. Micropropagation of berry crops for creation of germplasm cryobanks. *Brazilian Journal of Biology*. 2024;84:e266975. DOI: 10.1590/1519-6984.266975
- Ukhatova Y.V., Dunaeva S.E., Antonova O.Y., Apalikova O.V., Pozdniakova K.S., Novikova L.Y., Shuvalova L.E., Gavrilenko T.A. Cryopreservation of red raspberry cultivars from the VIR *in vitro* collection using a modified droplet vitrification method. *In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant*. 2017;53:394-401. DOI: 10.1007/s11627-017-9860-3
- Viss P.R., Brooks E.M., Driver J.A. A simplified method for the control of bacterial contamination in shoot cultures of woody plants. *Plant Science Letters*. 1984;34:203-209.
- Volk G.M., Henk A.D., Jenderek M.M., Richards C.M. Probabilistic viability calculations for cryopreserving vegetatively propagated collections in genebanks. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2017;64(7):1613-1622. DOI: 10.1007/s10722-016-0460-6
- Vujović T., Ružić D., Cerović R. Effect of the duration of liquid nitrogen storage on the regrowth of blackberry cryopreserved by droplet vitrification. *Contemporary Agriculture*. 2017;66:44-50. DOI: 10.1515/contagri-2017-0008
- Vujović T., Sylvestre I., Ružić D., Engelmann F. Droplet-vitrification of apical shoot tips of *Rubus fruticosus* L. and *Prunus cerasifera* Ehrh. *Scientia Horticulturae*. 2011;130(1):222-228. DOI: 10.1016/j.scienta.2011.06.049
- Vysotskaya O.N., Mochammed A.I., Butenko R.G. Cryopreservation of red raspberry meristems (*Rubus idaeus* L.) isolated from *in vitro* plantlets. *Biology Bulletin*. 1999;26(1):19-22.
- Yuurieva N., Sinetova M., Messineva E., Kulichenko I., Fomenkov F., Vysotskaya O., Osipova E., Baikalova A., Prudnikova O., Titova M., Nosov A.V., Popova E. Plants, cells, algae, and cyanobacteria *in vitro* and cryobank collections at the Institute of Plant Physiology, Russian Academy of Sciences – a platform for research and production center. *Biology*. 2023;12:838. DOI: 10.3390/biology12060838

### Информация об авторах

**Светлана Ефимовна Дунаева**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, отдел биотехнологии, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44, [dunaevase@mail.ru](mailto:dunaevase@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7002-8066>

**Леонид Леонидович Малышев**, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, отдел генетических ресурсов овса, ржи, ячменя, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44, [l.malyshhev@vir.nw.ru](mailto:l.malyshhev@vir.nw.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8595-1336>

**Ольга Владимировна Лисицына**, ведущий специалист, отдел биотехнологии, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44, [olgalis86@yandex.ru](mailto:olgalis86@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6632-3465>

---

**Татьяна Андреевна Гавриленко**, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, отдел биотехнологии, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44, [tatjana9972@yandex.ru](mailto:tatjana9972@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2605-6569>

### ***Information about the authors***

**Svetlana E. Dunaeva**, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Biotechnology Department, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 42, 44, Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190000 Russia, [dunaevase@mail.ru](mailto:dunaevase@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7002-8066>

**Leonid L. Malyshev**, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Department of Oat, Rye, Barley Genetic Resources, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 42, 44, Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190000 Russia, [l.malyshev@vir.nw.ru](mailto:l.malyshev@vir.nw.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8595-1336>

**Olga V. Lisitsyna**, Leading Specialist, Biotechnology Department, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 42, 44, Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190000 Russia, [olgalis86@yandex.ru](mailto:olgalis86@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6632-3465>

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

#### ***Вклад авторов:***

Дунаева С.Е.: курирование данных, написание статьи;

Мальшев Л.Л.: статистический анализ данных;

Лисицына О.В.: микроразмножение и криоконсервация образцов, закладка в криобанк;

Гавриленко Т.А.: планирование, написание статьи, рецензирование и редактирование.

#### ***Contribution of the authors:***

Dunaeva S.E.: data curation, article writing;

Malyshev L.L.: statistical data analysis;

Lisitsyna O.V.: micropropagation and cryopreservation of accessions, cryobanking;

Gavrilenko T.A.: planning, article writing, reviewing and editing.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 29.09.2025; одобрена после рецензирования 16.01.2026; принята к публикации 16.02.2026.

The article was submitted on 29.09.2025; approved after reviewing on 16.01.2026; accepted for publication on 16.02.2026.

Научная статья

УДК 631.52:635.9

DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-03



## Оценка регенерационного потенциала каллусной ткани сортов *Actinidia chinensis* var. *deliciosa* (A. Chev.) C.F. Liang & A.R. Ferguson в культуре *in vitro*

Р. С. Рахмангулов<sup>1</sup>, Н. Г. Тихонова<sup>1</sup>, А. А. Иванов<sup>1</sup>, М. В. Ерастенкова<sup>1</sup>, К. М. Межина<sup>1</sup>, Е. В. Евдокимов<sup>2,3</sup>, Ю. В. Ухатова<sup>1</sup>, Е. К. Хлесткина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР), Россия, Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР), Адлерская опытная станция – филиал ВИР, Россия, Сочи

<sup>3</sup> Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН), Сочинский институт (филиал) РУДН, Россия, Сочи

**Автор, ответственный за переписку:** Рахмангулов Руслан Султанович, r.rakhmangulov@vir.nw.ru

**Актуальность.** Применение современных агробиотехнологических методов позволяет получать качественно новые высокорентабельные сорта актинидии с повышенным содержанием биологически активных веществ. Достижение подобных результатов возможно при комплексном изучении генетических ресурсов растений коллекции ВИР, в том числе и в асептических условиях *in vitro*. В этой связи актуальным является изучение вопросов индукции каллусогенеза с последующей пролиферацией у перспективных сортов *Actinidia chinensis* var. *deliciosa* (A. Chev.) C.F. Liang & A.R. Ferguson в условиях *in vitro* с целью их сохранения для дальнейшей селекции. **Материалы и методы.** Объектами исследования стали четыре сорта *A. chinensis* var. *deliciosa* коллекции ВИР ‘Hayward’, ‘Bruno’, ‘Monty’, ‘Allison’. В качестве эксплантов для введения в условия *in vitro* использовали молодые побеги проростков, выращенных в культуральных сосудах в условиях климатической камеры. На данном этапе использовали три стерилизующих вещества. Побеги вводили в пробирки с питательной средой по прописи Мурасиге и Скуга (МС). На десятые сутки производили учет эффективности введения в культуру при стерилизации различными видами веществ. Для индукции каллусогенеза использовали листовые сегменты с микрорастений актинидии, которые помещали на питательную среду МС с различным сочетанием регуляторов роста. Для изучения эффективности препарата 3-гидрокситетрагидрофурана (рифтал), регулятора роста растений, был заложен опыт, в котором стабильно растущий каллус был пересажен на четыре варианта питательной среды МС с добавлением 1 мл/л препарата различной концентрации. Непосредственно для индукции органогенеза использовали каллус сортов актинидии, поддерживаемый в течение трех лет. **Результаты и обсуждение.** Наилучший результат с точки зрения эффективности стерилизации и жизнеспособности эксплантов показал вариант стерилизации побегов 10%-ным раствором «Белизны», универсальным моющим, дезинфицирующим и отбеливающим средством. Образование первичного каллуса отмечено на всех вариантах питательных сред для индукции каллусогенеза. При последующем культивировании каллусной ткани на питательных средах МС, содержащих 2,4-Д в своем составе, отмечено образование рыхлого, водянистого, бесхлорофильного каллуса. В опыте по изучению влияния рифтала отмечен стабильный рост каллуса на всех вариантах питательных сред и зафиксировано образование корней у сортов ‘Hayward’, ‘Allison’, ‘Bruno’. Отмечен органогенез в каллусной ткани у всех изучаемых сортов. **Заключение.** Оценка регенерационного потенциала *A. deliciosa* у сортов ‘Hayward’, ‘Allison’, ‘Bruno’, ‘Monty’, позволила выявить сорта ‘Hayward’ и ‘Allison’ с наибольшим количеством регенерантов на органогенный каллус: 2,2 и 3,7 соответственно. Полученные результаты послужат основой для интенсификации селекционного процесса представителей рода *Actinidia* с применением современных молекулярно-генетических и биотехнологических методов, в том числе и с помощью геномного редактирования CRISPR/Cas.

**Ключевые слова:** генетические ресурсы растений, *Actinidia* (Lindl.), каллусная ткань, регенерация микрорастений *in vitro*, каллусогенез, органогенез

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания ВИР согласно тематическому плану НИР № FGEM-2025-0008 «Разработка подходов ускоренной селекции для улучшения хозяйственно ценных признаков декоративных и ягодных культур».

**Для цитирования:** Рахмангулов Р.С., Тихонова Н.Г., Иванов А.А., Ерастенкова М.В., Межина К.М., Евдокимов Е.В., Ухатова Ю.В., Хлесткина Е.К. Оценка регенерационного потенциала каллусной ткани сортов *Actinidia chinensis* var. *deliciosa* (A. Chev.) C.F. Liang & A.R. Ferguson в культуре *in vitro*. *Биотехнология и селекция растений*. 2026;9(1):49-63. DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-03

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.

© Рахмангулов Р.С., Тихонова Н.Г., Иванов А.А., Ерастенкова М.В., Межина К.М., Евдокимов Е.В., Ухатова Ю.В., Хлесткина Е.К., 2026

## Original article

DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-o3

## Evaluation of the regenerative potential of callus tissue in *Actinidia chinensis* var. *deliciosa* (A.Chev.) C.F. Liang & A.R. Ferguson cultivars in *in vitro* culture

Ruslan S. Rakhmangulov<sup>1</sup>, Nadezhda G. Tikhonova<sup>1</sup>, Aleksandr A. Ivanov<sup>1</sup>, Mariya V. Erastenkova<sup>1</sup>, Ksenya M. Mezhdina<sup>1</sup>, Evgeny V. Evdokimov<sup>2,3</sup>, Yulia V. Ukhatova<sup>1</sup>, Elena K. Khlestkina<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), Adler Experiment Station, a branch of VIR, Sochi, Russia

<sup>3</sup> Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN University), Sochi Institute (branch) RUDN University, Sochi, Russia

**Corresponding author:** Ruslan S. Rakhmangulov, r.rakhmangulov@vir.nw.ru

**Background.** The use of modern agrobiotechnological methods allows for obtaining qualitatively new highly profitable *Actinidia* cultivars with an increased content of bioactive substances. Achieving such results is possible through a comprehensive study and use of genetic resources of plants from the VIR collection, including *in vitro* aseptic conditions. In this regard, it is relevant to study the issues of callusogenesis induction with subsequent proliferation of promising cultivars of *Actinidia chinensis* var. *deliciosa* (A. Chev.) C.F. Liang & A.R. Ferguson *in vitro* with the aim of preserving them for further selection. **Materials and methods.** The objects of the study were the cultivars: 'Hayward', 'Bruno', 'Monty', and 'Allison' of *A. chinensis* var. *deliciosa* from the VIR collection. Young shoots of plantlets from seeds germinated in culture vessels in a climatic chamber were used as explants for introduction into artificial culture conditions. At this stage, three variants of sterilizing agents were tested for identifying the main substance for multi-stage sterilization of explants. Shoots were placed in test tubes with a nutrient medium according to the Murashige and Skoog (MS) prescription. On day 10, the efficiency of introduction applying different types of sterilizing substances was assessed. To induce callusogenesis, leaf segments from *Actinidia* microplants were planted on four variants of the MS nutrient medium with different combinations of growth regulators. In order to determine the efficiency of 3-Hydroxytetrahydrofuran (Riftal) plant growth regulator, a steadily growing callus was transplanted onto four variants of the MS nutrient medium with the addition of 1 ml/l of the growth regulator at different concentrations. Calluses of *Actinidia* cultivars maintained *in vitro* for three years were used directly for the induction of organogenesis. **Results and discussion.** The best result in terms of sterilization efficiency and explant viability was shown by the variant of shoot sterilization with a 10% solution of "Belizna", a universal detergent, disinfectant and bleaching agent. Primary callus formation was noted on all variants of nutrient media for callusogenesis induction. However, the subsequent cultivation of callus tissue on MS nutrient media containing 2,4-D, resulted in formation of loose, hydrated, chlorophyll-free calli. In the experiment focused on the effect of Riftal, steady callus growth was noted on all variants of nutrient media and root formation was recorded in cultivars 'Hayward', 'Allison', and 'Bruno'. Organogenesis was noted in callus tissue of all studied cultivars. **Conclusions.** Evaluation of the regenerative potential of *A. chinensis* var. *deliciosa* cultivars 'Hayward', 'Allison', 'Bruno', and 'Monty' has shown that 'Hayward' and 'Allison' have the highest number of regenerants per organogenic callus: 2.2 and 3.7, respectively. The obtained results will serve for intensifying the breeding within the genus *Actinidia* using modern molecular genetics and biotechnological methods, including CRISPR/Cas genome editing.

**Keywords:** plant genetic resources, *Actinidia* (Lindl.), callus tissue, *in vitro* microplant regeneration, callusogenesis, organogenesis

**Acknowledgements:** the work was carried out within the framework of the State Assignment to VIR in accordance with the SRW Thematic Plan Topic No. FGEM-2025-0008 "Development of accelerated breeding approaches to improve the economically valuable properties of ornamental and berry crops".

**For citation:** Rakhmangulov R.S., Tikhonova N.G., Ivanov A.A., Erastenkova M.V., Mezhdina K.M., Evdokimov E.V., Ukhatova Yu.V., Khlestkina E.K. Evaluation of the regenerative potential of callus tissue in *Actinidia chinensis* var. *deliciosa* (A. Chev.) C.F. Liang & A.R. Ferguson cultivars in *in vitro* culture. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2026;9(1):49-63. (In Russ.). DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-o3

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

© Rakhmangulov R.S., Tikhonova N.G., Ivanov A.A., Erastenkova M.V., Mezhdina K.M., Evdokimov E.V., Ukhatova Yu.V., Khlestkina E.K., 2026

## Введение

Современное международное сообщество и мировая экономика переживают переход производительных сил в шестой технологический уклад, успешная реализация которого в первую очередь будет зависеть от эффективного использования имеющихся инноваций. В России с целью сохранения технологического суверенитета наблюдается активное развитие стратегии НТР (On the Strategy..., 2024). В области сельского хозяйства в рамках ФНТП на 2017-2030 годы (Federal Scientific and Technical Program..., 2017) особое внимание уделяется выведению сортов растений с качественно новыми заданными характеристиками. Для достижения подобных результатов имеется полный арсенал современных агробιοтехнологических и молекулярно-генетических методов, коллекции генетических ресурсов растений, что позволяет обеспечить продовольственную безопасность страны, сохранить лидерские позиции в экспорте как на традиционных рынках, так и расширить присутствие на рынке Азиатско-Тихоокеанского экономического сотрудничества.

Одним из таких молекулярно-генетических методов является геномное редактирование CRISPR/Cas. Совершенствованию и развитию технологии геномного редактирования опосредованного системой CRISPR/Cas, посвящено множество обзоров и методологических работ, в которых сообщается о значимых успехах редактирования генов 186 генотипов ряда злаковых, овощных, плодовых, ягодных, декоративных культур (Khlestkina, Shumny, 2016; Tikhonova, Khlestkina, 2019; Kuluev et al., 2019; Strygina, Khlestkina, 2020; Rakhmangulov, Tikhonova, 2021; Rakhmangulov, 2022; Rakhmangulov et al., 2022; Ukhatova et al., 2023).

В настоящее время в России развитию концепции функционального питания уделяется все больше внимания в соответствии с основными положениями Доктрины продовольственной безопасности страны (On approval of the Doctrine ..., 2020). Формирование теоретических основ, организация производства, реализация и употребление функциональных пищевых продуктов ориентировано на оздоровление населения путем корректировки биохимического состава продуктов питания массового потребления. Среди основных задач, на решение которых направлено функциональное питание, отмечается и восполнение дефицита микронутриентов (Dydykin, Aslamova, 2016). Добавление в рацион разнообразных продуктов питания богатых микронутриентами способствует предупреждению и снижению риска развития хронических заболеваний и замедлению процессов старения. Одними из таких микронутриентов являются биологически активные вещества, которым свойственны антиоксидантные, противовоспалительные, гипогликемические, антимуtagenные, антидиабетические, противораковые, нейропротекторные свойства (Fotev et al., 2018; Yudina et al., 2021). Больше всего данных веществ содержится в плодах и ягодах садовых культур. В связи с этим отме-

чают актуальность разработки селекционных программ, ориентированных на создание новых сортов растений с повышенным содержанием биологически активных веществ (Yudina et al., 2021).

Среди таких растений особое место занимает актинидия, к которой в последнее время возрастает интерес ввиду ценных биологически активных веществ в плодах. Так по данным FAO в 2022 году, мировой уровень производства актинидии достиг 4,5 млн тонн (FAOSTAT, 2024).

Род *Actinidia* (Lindl.) насчитывает свыше 70 видов, которые представлены в основном многолетними кустарниковыми лианами из субтропических лесных регионов Юго-Восточной Азии. В промышленном масштабе возделывается вид *Actinidia chinensis* Planch., в рамках которого различают два подвида: *A. chinensis* Planch. var. *chinensis* и *A. chinensis* var. *deliciosa* (A. Chev.) C.F. Liang & A.R. Ferguson. Основные площади возделывания актинидии заняты сортом 'Hayward' *A. chinensis* var. *deliciosa*, на который приходится 90-95% реализуемых плодов актинидии. Другим видом, который набирает популярность в Европе, является *A. arguta* Planch. (Latocha et al., 2011; Molkanova et al., 2022). В России на Дальнем Востоке встречаются естественные места произрастания *Actinidia kolomikta* (Rupr. et Maxim.) Maxim., *A. arguta* Planch., *A. giraldii* Diels. и *A. polygama* (Sieb. et Zucc.) Maxim. (Kolbasina, 2000). На черноморском побережье Западного Кавказа интродуцирована *A. chinensis* var. *deliciosa*, где ее выращивают в промышленном масштабе в условиях открытого грунта (Tarasenko, 1999).

Работы по интродукции в культуру дальневосточных видов актинидии начаты еще в конце XIX века (Plekhanova, 1990), позже предприняты попытки интродукции *A. deliciosa* (Michurin, 1940; Plekhanova, 1990; Tarasenko, 1999) в различные географические зоны. В 1985 году в условиях Адлерской опытной станции – филиала ВИР (Адлерская ОС – филиал ВИР) заложен первый сад *A. deliciosa*, который и сейчас сохранен, и даже пополнен образцами других видов актинидии. В последующем в условиях субтропиков были изучены особенности биологии, требования к условиям выращивания *A. deliciosa*, *A. kolomikta*, *A. arguta* (Plekhanova, 1990; Tarasenko, 1999; Kolbasina, 2000; Tutberidze, 2004; Aiba, 2004; Tutberidze et al., 2012), разработаны технологические регламенты вегетативного размножения *A. deliciosa* зелеными и одревесневшими черенками в условиях субтропиков России (Ryndin et al., 2014). К настоящему времени разработаны биотехнологические методы культивирования органов и тканей в условиях *in vitro* ряда видов *Actinidia*. Установлено, что на регенерационный потенциал *A. chinensis* var. *deliciosa* (Mitrofanova, 2000; Malyarovskaya et al., 2024), *A. kolomikta*, *A. arguta*, *A. polygama* (Konovalova et al., 2008; Krakhmaleva et al., 2023) влияют следующие факторы: вид, подвид, сорт, тип исходного экспланта и концентрация регуляторов роста.

Россия обладает лишь незначительными площадями Черноморского побережья, пригодными для возделыва-

ния *A. chinensis* var. *deliciosa*, поэтому актуальным вопросом селекции становится продвижение данной культуры в более северные районы. Учеными ВИР и ФНЦ Садоводства ведутся эколого-географические исследования образцов различных видов актинидии в условиях умеренного климата Подмосковья и Северо-Запада России (Plekhanova, 1983; Kolbasina, Kozak, 2014; Kozak et al., 2015). В целом, имеется значительный потенциал для расширения ареала культивирования видов *Actinidia* на территории России. Ускоренному расширению ареала возделывания данной культуры может способствовать комплексное изучение генетических ресурсов, в том числе с применением современных молекулярно-генетических и биотехнологических методов, что в последующем позволит получить новые высокоурожайные сорта актинидии с повышенным содержанием биологически

активных веществ, адаптированных к умеренному климату России.

**Целью данной работы** явилось изучение вопросов индукции каллусогенеза с последующей пролиферацией почек и побегов у перспективных сортов *A. chinensis* var. *deliciosa* в условиях *in vitro* для дальнейших селекционных работ.

## Материалы и методы

Объектами исследования стали четыре генотипа *A. chinensis* var. *deliciosa* (A. Chev.) C.F. Liang & A.R. Ferguson, поддерживаемые на коллекционном участке Адлерской ОС – филиала ВИР (табл. 1). В качестве эксплантов использовали молодые активно вегетирующие побеги и сегменты листовых пластинок.

**Таблица 1. Образцы *Actinidia chinensis* var. *deliciosa* (A. Chev.) C.F. Liang & A.R. Ferguson из коллекции ВИР, взятые в качестве материала исследований**

**Table 1. Accessions of *A. chinensis* var. *deliciosa* (A. Chev.) C.F. Liang & A.R. Ferguson from the VIR collection taken as research material**

№	Наименование сорта/ Cultivar name	№ каталога ВИР/ VIR Catalogue No.	Происхождение/ Origin
1	'Hayward'	к-44018	Болгария
2	'Bruno'	к-44020	Болгария
3	'Monty'	к-44019	Болгария
4	'Allison'	к-44022	Болгария

Для отработки этапа введения в асептические условия использовали различные стерилизующие вещества, среди которых 10%-ный раствор «Белизны» (гипохлорит натрия), 10% перекись водорода и 3% раствор «Велтолена» (клатрат четвертичного аммониевого соединения с карбамидом). Для апробации способов стерилизации был задействован сорт 'Hayward' в качестве модельного объекта. Далее экспланты всех четырех генотипов актинидии стерилизовали лишь одним вариантом основного действующего вещества. Процесс стерилизации эксплантов состоял из поверхностной очистки с помощью моющего средства в течение 10 минут, обработки 70% этиловым спиртом в течение 30 секунд и стерилизации основным действующим веществом в зависимости от варианта опыта в течение 10 минут. После стерилизации производили 3-х кратную промывку эксплантов в стерильной дистиллированной воде. Для каждого образца брали по 10 эксплантов в трехкратной повторности при введении побегов в культуру *in vitro*, а также листовые диски с микрорастений актинидии, поддерживаемые в культуре *in vitro* для индукции каллусогенеза и последующего органогенеза. Введение в условия *in vitro* осуществляли в пробирках с питательной средой МС (Sigma-Aldrich; Murashige, Skoog, 1962). Опытные экспланты содержали в комнате искусственного климата при фотопериоде 16 час. свет/8 час. темнота и температуре

25±1,0°C, влажности 70% и освещенности 5000 Лк. Учет на наличие контаминации и некроза проводили на 10 день введения эксплантов в условия *in vitro*.

Для инициации роста побегов и индукции каллусогенеза был произведен пассаж на питательные среды по прописи МС с различным сочетанием регуляторов роста (табл. 2). В дальнейшем, после определения оптимального соотношения фитогормонов для стабильного роста каллусной ткани, поддержание каллуса осуществлялось на одной среде с пассажем один раз в два месяца. На момент закладки опыта по регенерации микрорастений из каллусной ткани возраст каллуса всех изучаемых образцов составлял три года.

**Статистический анализ.** Все данные представлены как среднее значение ± стандартное отклонение (SD). Статистическую обработку данных проводили с помощью стандартного программного пакета Microsoft Office Excel 2016, Statistica 12.0. Различия между средними значениями нескольких групп определяли с помощью теста Тьюки. Все различия считались статистически значимыми при  $p < 0,05$ .

## Результаты и обсуждение

Общеизвестно, что стерилизация многолетних древесных культур является трудоемким процессом и при-

**Таблица 2. Варианты соотношения фитогормонов для роста побегов, индукции каллусной ткани и регенерации микрорастений актинидии**

**Table 2. Variants of phytohormones ratio for shoot growth, callus tissue induction and regeneration of *Actinidia* microplants**

№	Регуляторы роста, мг/л / Growth regulators, mg/L	Ссылка / Reference
<b>Побеги</b>		
МС-1	1,0 БАП+0,1 ИУК	модифицировано по Corsi, 2014
МС-2	2,0 БАП+0,1 ИУК	модифицировано по Corsi, 2014
МС-3	1,0 КИН+0,1 ИУК	модифицировано по Corsi, 2014
МС-4	2,0 КИН+0,1 ИУК	модифицировано по Corsi, 2014
<b>Листовые сегменты</b>		
МС-5	2,0 2,4-Д	модифицировано по Revilla, Power, 1988
МС-6	2,5 БАП+2,0 НУК	модифицировано по Gvasaliya, 2013
МС-7	1,0 БАП+0,5 2,4-Д+0,1 ИУК	модифицировано по Gvasaliya, 2013
МС-8	1 зеатин+0,1 ИУК	модифицировано по Oliveira, 2005
<b>Каллус</b>		
МС-9	1 мл 0,001% рифтал	Talipov et al., 1999
МС-10	1 мл 0,0005% рифтал	Talipov et al., 1999
МС-11	1 мл 0,0001% рифтал	Talipov et al., 1999
МС-12	1 мл 0,00005% рифтал	Talipov et al., 1999
<b>Регенерация</b>		
МС-13	6 зеатин+0,1 НУК	модифицировано по Wang et al., 2007
МС-14	3 зеатин+0,1 НУК	Wang et al., 2007
МС-15	2,5 БАП+2,0 НУК	модифицировано по Gvasaliya, 2013

водит к низким результатам введения в условия *in vitro*. Сад актинидии на Адлерской ОС – филиале ВИР заложен в 1985 году на площади 5 га, представляет собой единственный на территории России промышленный сад. В случаях введения побегов с многолетних растений в условия *in vitro*, с целью повышения эффективности стерилизации применяют различные способы, среди которых выращивание маточных растений в горшках в контролируемых условиях теплицы, предобработка побегов непосредственно перед основной стерилизацией, а также многоступенчатая деконтаминация с использованием ряда стерилизующих агентов (Rakhmangulov et al., 2018). В нашем случае мы использовали многоступенчатую поверхностную обработку и стерилизацию эксплантов, апробированную ранее на ряде декоративных кустар-

ников и субтропических древесных культур (Gvasaliya, 2013; Kolomiets et al., 2014; Malyarovskaya et al., 2020). В качестве эксплантов использовали невызревшие фрагменты побега с одной почкой. Для более полного понимания применимости данного многоступенчатого способа при работе с эксплантами актинидии использовали ряд стерилизующих веществ: 10%-ный раствор «Белизны», 10%-ная перекись водорода и 3%-ный раствор «Велтолена». В результате эмпирическим путем установлено, что лучшим вариантом стерилизации является 10%-ный раствор «Белизны» с 83%-ной эффективностью выхода чистых и жизнеспособных эксплантов. 3%-ный раствор «Велтолена» и 10%-ная перекись водорода оказались менее эффективными (табл. 3). Далее в работе при введении в культуру *in vitro* всех образцов актинидии, исполь-

**Таблица 3. Варианты стерилизации побегов актинидии**

**Table 3. Options for sterilizing *Actinidia* shoots**

№/ No.	Наименование / Name	Контаминация, %/ Contamination, %	Некроз, %/ Necrosis, %	Стерильные экспланты, %/ Sterile explants, %
Апробация				
1	«Белизна», 10%	17	-	83
2	Перекись водорода, 10%	25	-	75
3	«Велтолен», 3%	-	39	61
Основная стерилизация эксплантов сортов (10% «Белизна»)				
1	‘Hayward’	30	-	70
2	‘Bruno’	15	-	75
3	‘Monty’	20	-	80
4	‘Allison’	38	-	62

зовали многоступенчатую стерилизацию с 10%-ным раствором «Белизны». Эффективность стерилизации оказалась ниже, чем при апробации, однако она была в пределах, необходимых для получения достаточного количества качественного материала для дальнейших работ.

В последующем с образцами актинидии был заложен опыт по выявлению степени влияния концентрации некоторых фитогормонов на рост и развитие побегов (рис. 1,

табл. 4). В результате сравнения данных установили наибольшие значения средних длин микропобегов у сортов: ‘Hayward’ – 1,65 см (МС-2), ‘Bruno’ – 1,42 см (МС-1). Для сорта ‘Allison’ оптимальной питательной средой стал вариант МС-3 со средней длиной микропобегов 1,32 см, тогда как для сорта ‘Monty’ ею оказалась среда МС-1. Достоверно значимых различий для сортов ‘Allison’ и ‘Monty’ не выявлено (см. табл. 4).

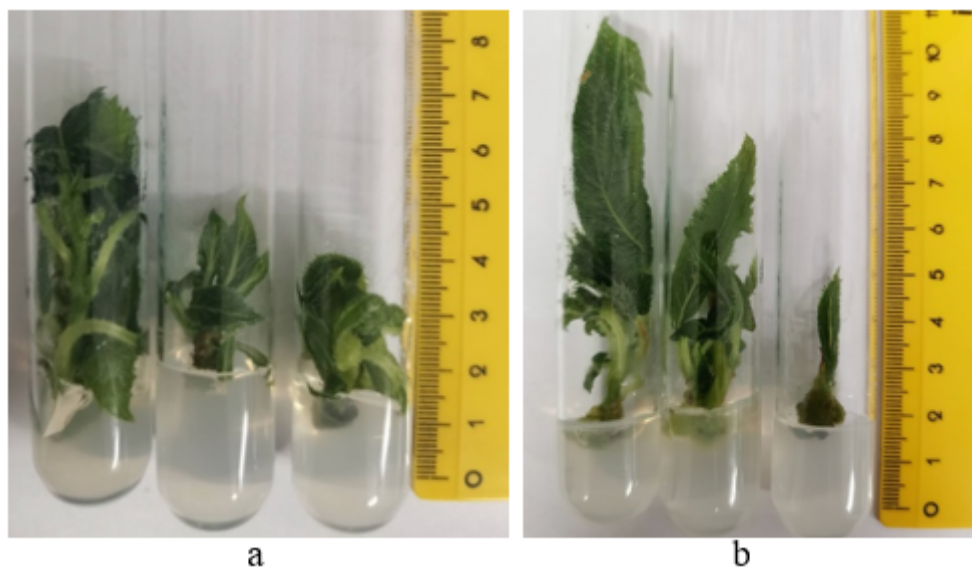


Рис. 1. Микрорастения актинидии сортов ‘Monty’ (a) и ‘Bruno’ (b) после введения в культуру *in vitro* фрагментов побегов с почкой

Fig. 1. Micro plants of *Actinidia* cultivars ‘Monty’ (a) and ‘Bruno’ (b) after introduction of shoot fragments with a bud into *in vitro* culture

Таблица 4. Средняя длина микропобегов актинидии

Table 4. Average length of *Actinidia* microshoots

№/ No.	Название сорта/ Cultivar name	Вариант питательной среды, длина побега, см/ Culture medium option, shoot length, cm			
		МС-1	МС-2	МС-3	МС-4
1	‘Hayward’	1,25±0,58 <sup>c,d*</sup>	1,65±0,64 <sup>c</sup>	0,7±0,21 <sup>a,b</sup>	0,79±0,23 <sup>a</sup>
2	‘Allison’	1,04±0,86	1,11±0,61	1,32±0,54	0,86±0,34
3	‘Bruno’	1,42±0,76 <sup>d</sup>	1,11±0,57 <sup>c</sup>	0,98±0,70 <sup>b</sup>	0,68±0,41 <sup>a</sup>
4	‘Monty’	1,3±0,73	1,07±0,74	1,21±0,64	1,14±0,44

Примечание: в таблице приведены средние значения ±SD

\*a, b, c, d – значимые отличия средних значений длин микропобегов между вариантами питательных сред

Note: The table shows mean values ±SD.

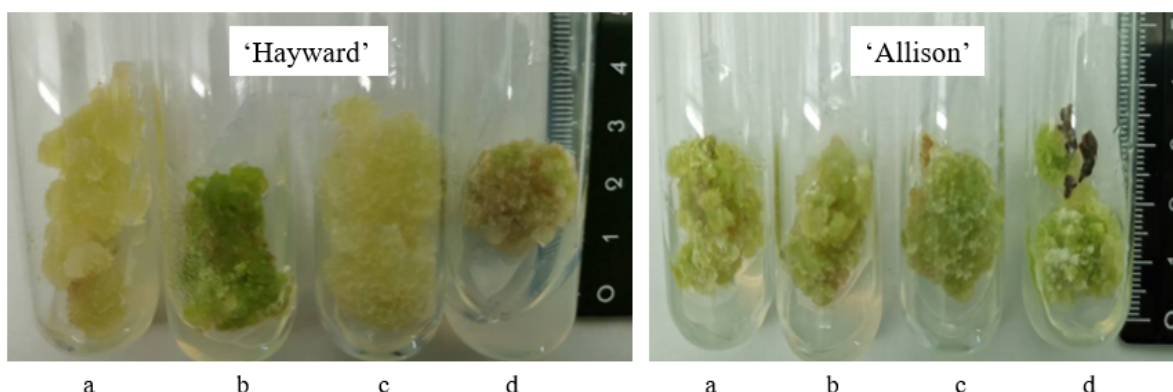
\*a, b, c, d – significant differences in average microshoot length between nutrient media options

В исследовании наших коллег В.И. Маляровской с соавторами (Malyarovskaya et al., 2023) по изучению особенностей влияния типов и концентраций цитокининов на этапе микроразмножения лучший вариант питательной среды для сорта ‘Hayward’ со средним значением длины микропобегов в 3,96 см отмечен при воздействии

2 мг/л БАП+1 мг/л ГК<sub>3</sub>, тогда как в случае МС без ГК<sub>3</sub> только с 2 мг/л БАП – 2,11 см, что на 0,46 см больше, чем у образцов актинидии ‘Hayward’ в данном эксперименте. В свою очередь, для сорта ‘Monty’ также наибольший показатель средней длины микропобегов отмечен на питательной среде с 2 мг/л БАП+1 мг/л ГК<sub>3</sub>, тогда

как на среде без ГК<sub>3</sub> только с 2 мг/л БАП – 1,11 см, что в определённой степени согласуется с нашими данными. Различия в морфометрических показателях средних длин микропобегов сорта ‘Hayward’, возможно, могут быть объяснены разным возрастом маточных растений Адлерской ОС – филиала ВИР (год закладки – 1985 год) и растений коллекции ФИЦ «Субтропический научный центр РАН» (год закладки – 2021 год) (Malyarovskaya et al., 2023).

В дальнейшем с целью индукции каллусогенеза был осуществлен пассаж листьев с ранее введенных в культуру побегов всех изучаемых образцов актинидии на питательные среды с различным сочетанием регуляторов роста (табл. 5). В результате на всех апробированных вариантах питательных сред отмечен активный прирост каллусной ткани различной структуры и цвета в зависимости от концентрации и сочетания гормонов (рис. 2).



**Рис. 2. Каллусная ткань актинидии сортов ‘Hayward’ (слева) и ‘Allison’ (справа) на питательных средах для каллусогенеза**

Питательные среды. а – МС-5 : 2,0 мг/л 2,4-Д; б – МС-6: 2,5 мг/л БАП+2,0 мг/л НУК; с – МС-7: 1,0 мг/л БАП+0,5 мг/л 2,4-Д+0,1 мг/л ИУК; д – МС-8: 1,0 мг/л зеатин+0,1 мг/л НУК

**Fig. 2. Callus tissue of *Actinidia* cvs. ‘Hayward’ (left) and ‘Allison’ (right) on nutrient media for callusogenesis**

Nutrient media. а – МС-5: 2.0 mg/l 2,4-D; б – МС-6: 2.5 mg/l BAP+2.0 mg/l NAA; с – МС-7: 1.0 mg/l BAP+0.5 mg/l 2,4-D +0.1 mg/l IAA; д – МС-8: 1.0 mg/l zeatin+0.1 mg/l NAA

**Таблица 5. Средняя масса каллуса образцов актинидии**

**Table 5. Average callus mass of *Actinidia* accessions**

№/ No.	Сорт/ Cultivar	Вариант питательной среды, масса каллуса, г/ Culture medium variant, callus mass, g			
		МС-5	МС-6	МС-7	МС-8
1	‘Hayward’	1,97±0,49 <sup>c*</sup>	1,97±0,66 <sup>c</sup>	2,80±0,51 <sup>a,b,d</sup>	1,56±0,26 <sup>c</sup>
2	‘Allison’	2,16±0,77 <sup>b,d</sup>	1,54±0,35 <sup>a</sup>	1,91±0,42	1,50±0,37 <sup>a</sup>
3	‘Bruno’	2,46±0,45 <sup>b,d</sup>	1,40±0,55 <sup>a,c</sup>	2,16±0,87 <sup>b,d</sup>	1,41±0,20 <sup>a,c</sup>
4	‘Monty’	2,09±0,67 <sup>b,c,d</sup>	1,60±0,29 <sup>a,c</sup>	2,66±0,32 <sup>a,b,d</sup>	1,70±0,29 <sup>a,c</sup>

Примечание: в таблице приведены средние значения ±SD

\*a, b, c, d – значимые отличия средних значений массы каллуса между вариантами питательных сред

Note: The table shows mean values ±SD.

\*a, b, c, d – significant differences in average callus mass between nutrient medium options

Таким образом, лучшим вариантом питательной среды для индукции и прироста каллусной ткани для сортов ‘Hayward’ и ‘Monty’ является МС-7 (1,0 БАП+0,5 мг/л 2,4-Д+0,1 мг/л ИУК), МС-5 (2,0 мг/л 2,4-Д) для сортов ‘Allison’ и ‘Bruno’. Однако каллус на эксплантах всех образцов актинидии в вариантах питательных сред с наибольшим приростом массы имел рыхлую струк-

туру с обесцвеченными (бесхлорофильными) клетками. В варианте питательной среды МС-6 (2,5 мг/л БАП+2,0 мг/л НУК) каллус имел плотную структуру с насыщенной зелёной окраской. Перед нами стояла задача получения эмбрионного каллуса, поэтому мы учли и количественные, и качественные характеристики каллусной массы, и для дальнейшего поддержания в куль-

туре *in vitro* каллусной ткани образцов актинидии был выбран именно вариант МС-6, что позволяло производить пассирование образцов на новые питательные среды один раз в 2-3 месяца.

В дополнение к изучению потенциала роста каллусной ткани актинидии был осуществлен анализ влияния стимулятора роста растений, действующим веществом которого является тетрагидрофуранол-3 (Talipov et al., 1999), другое название соединения – 3-гидрокситетрафуран (рифтал) (Yamaleyeva et al., 2004). В ряде исследований показана положительная роль рифтала на прирост растительной биомассы у различных однодольных и двудольных культур. Так, в фазе формирования зерна у пшеницы и ячменя более интенсивное накопление белков происходит у растений, которые были обработаны рифталом. Также отмечено возрастание количества растворимых белков, глиадинов, гордеинов и снижение содержания глютеинов в зерне (Yamaleyeva et al.,

2004). Сообщается значимая роль в стимуляции увеличения массы корней и их удлинении на 28% по сравнению с контрольными образцами *Triticum aestivum* L. сорта ‘Казахстанская 10’ при стрессовых условиях дефицита минерального питания (Rakhmatullina et al., 2007). В результате нашей работы наибольший прирост массы каллуса отмечен для варианта 1 мл/л 0,0005% рифтала (МС-10) для сортов ‘Hayward’ и ‘Monty’, тогда как для сорта ‘Bruno’ отмечен вариант 1 мл/л 0,001% рифтала (МС-9) и вариант 1 мл/л 0,0001% рифтала (МС-11) для сорта ‘Allison’ (табл. 6). Также отмечено активное образование корней у образцов актинидии при различных вариантах концентрации рифтала (рис. 3), что позволяет предположить ауксиновую природу действующего вещества препарата рифтал и возможное стрессовое состояние каллусной ткани при уменьшении количества минеральных веществ в питательной среде.

**Таблица 6. Средняя масса каллуса образцов актинидии на питательных средах с препаратом рифтал**

**Table 6. Average callus mass of *Actinidia* accessions on nutrient media with Riftal chemical**

№/ No.	Сорт/ Cultivar	Вариант питательной среды, масса каллуса, г/ Culture medium option, callus mass, g			
		МС-9	МС-10	МС-11	МС-12
1	‘Hayward’	1,32±0,21 <sup>c*</sup>	1,73±0,60 <sup>c</sup>	0,62±0,28 <sup>a,b,d</sup>	1,44±0,71 <sup>a</sup>
2	‘Allison’	1,07±0,24 <sup>c</sup>	1,28±0,27	1,53±0,45 <sup>a</sup>	1,35±0,72
3	‘Bruno’	2,46±0,76 <sup>b,c</sup>	1,84±0,68 <sup>a,c,d</sup>	0,93±0,35 <sup>a,b</sup>	1,21±0,45 <sup>b</sup>
4	‘Monty’	1,23±0,15 <sup>b</sup>	1,78±0,55 <sup>a,c,d</sup>	1,28±0,19 <sup>b</sup>	1,45±0,18 <sup>a,b</sup>

Примечание: в таблице приведены средние значения ±SD.

\*a, b, c, d – значимые отличия средних значений массы каллуса между вариантами питательных сред

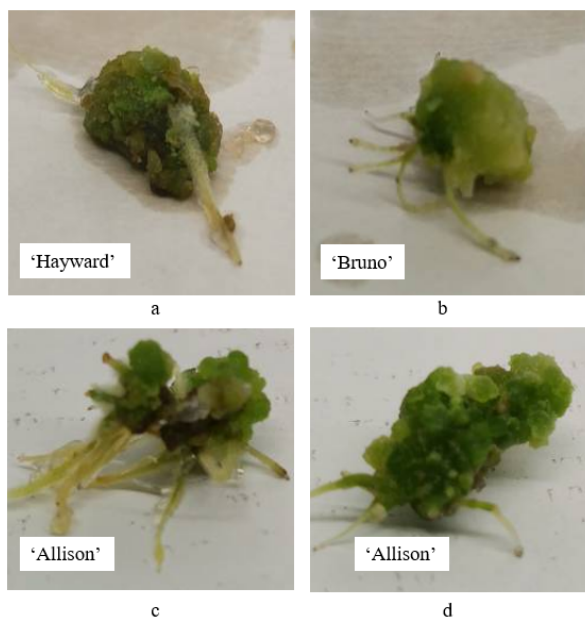
Note: The table shows mean values ±SD.

\*a, b, c, d – significant differences in average values of callus mass between nutrient medium options

**Оценка регенерационной способности в культуре *in vitro*.** Во время депонированного поддержания на разных питательных средах каллусной ткани образцов актинидии сортов ‘Hayward’, ‘Allison’, ‘Bruno’ отмечены единичные случаи образования регенерантов. Для сорта ‘Monty’ подобный случай отмечен лишь после введения побегов в культуру *in vitro*, на одном из которых на верхнем срезе экспланта регенеранты и образовались (рис. 4). Так в работе В.И. Маляровской с соавторами (Malyarovskaya et al., 2023) для сортов ‘Hayward’ и ‘Monty’ отмечается наибольшее количество микропобегов: 3,9 и 3,1 соответственно, на питательной среде МС с 2 мг/л БАП+1 мг/л ГК<sub>3</sub> (Malyarovskaya et al., 2023). В нашей работе для сортов ‘Hayward’ и ‘Monty’ на одном каллусе формировалось: 1-2,2 и 1,1-1,5 микрорастений соответственно.

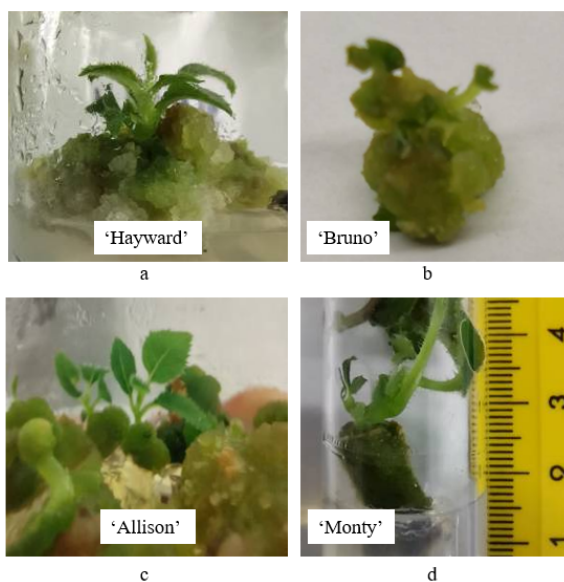
Целенаправленно для получения растений-регенерантов из каллусной ткани актинидии использовали моди-

фицированные варианты питательных сред, ранее апробированных другими авторами на листовых эксплантах с целью регенерации после агробактериальной трансформации *Actinidia chinensis* var. *chinensis* Hort16A (Wang et al., 2007). В результате скрининга регенерационной способности установлен наилучший вариант питательной среды с добавлением 6 мг/л зеатина+0,1 мг/л НУК (МС-13) для всех четырех сортов актинидии. Также установлены статистически достоверные различия по показателю среднего количества регенерантов на каллус между вариантами питательных сред (рис. 5, 6; табл. 7). Наибольшие значения среднего количества регенерантов на каллус: 2,2 и 3,7 отмечены для сортов ‘Hayward’ и ‘Allison’ соответственно. Наибольшее количество регенерантов и количество органогенного каллуса отмечено у сорта ‘Allison’ с показателями 92 регенеранта на 25 из 30 эксплантов каллусной ткани.



**Рис. 3. Влияние препарата рифтал на морфогенез каллуса актинидии**  
 Питательные среды. а – МС-9: 1 мл/л 0,001% рифтала; б – МС-10: 1 мл/л 0,0005% рифтала;  
 с, д – МС-11: 1 мл/л 0,0001% рифтала

**Fig. 3. Effect of Riflital chemical on *Actinidia* callus morphogenesis**  
 Nutrient media. а – МС-9: 1 ml/l 0.001% Riflital; б – МС-10: 1 ml/l 0.0005% Riflital;  
 с, д – МС-11: 1 ml/l 0.0001% Riflital



**Рис. 4. Спонтанный органогенез из каллусной ткани образцов актинидии**  
**на различных питательных средах**

Питательные среды. а – МС-13: 6 мг/л зеатин+0,1 мг/л НУК; б – МС-15: 2,5 мг/л БАП+2 мг/л  
 НУК; с – МС-14: 3 мг/л зеатин+0,1 мг/л НУК; д – 0,5 мг/л БАП

**Fig. 4. Spontaneous organogenesis from callus tissue of *Actinidia* accessions on various nutrient media**  
 Nutrient media. а – МС-13: 6 mg/l zeatin+0,1 mg/l NAA; б – МС-15: 2,5 mg/l BAP+2 mg/l  
 NAA; с – МС-14: 3 mg/l zeatin+0,1 mg/l NAA; д – 0,5 mg/l BAP

Таблица 7. Регенерационный потенциал каллусной ткани образцов актинидии

Table 7. Regenerative potential of callus tissue of *Actinidia* accessions

№/ No.	Сорт/ Cultivar	Вариант питательной среды/ Culture medium option	Количество органогенного каллуса/ Number of organogenic calli	Процент органогенного каллуса/ Organogenic callus frequency	Количество регенерантов/ Number of regenerants	Среднее количество регенерантов на каллус/ Mean number of regenerants per callus
1	'Hayward'	13	16	53,3	35	2,19±0,28
		14	12	40	20	1,67±0,36
		15	2	6,6	3	1,00
2	'Allison'	13	25	83,3	92	3,68±0,68
		14	20	66,6	40	2,00±0,28
		15	3	10	2	1,33±0,33
3	'Bruno'	13	11	36,6	21	1,91±0,25
		14	10	33,3	23	2,30±0,45
		15	1	3,3	1	1,00
4	'Monty'	13	11	43,3	15	1,15±0,15
		14	4	13,3	6	1,50±0,5
		15	0	0	0	0

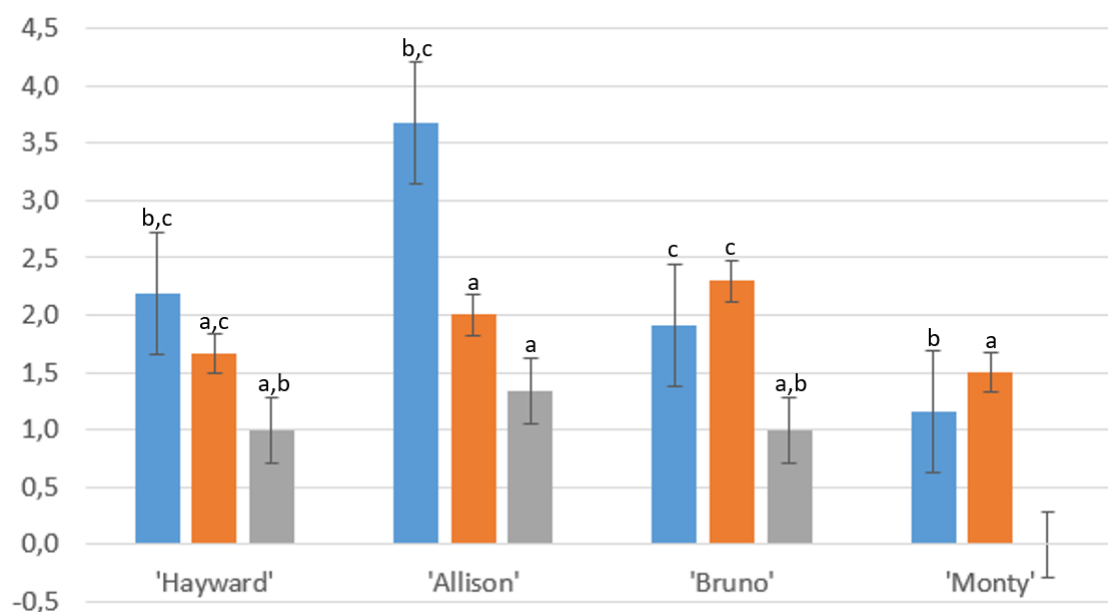


Рис. 5. Среднее количество растений-регенерантов на каллус образцов актинидии

Цветом обозначены питательные среды: 13 (синий) – 6 мг/л зеатин+0,1 мг/л НУК;

14 (оранжевый) – 3 мг/л зеатин+0,1 мг/л НУК; 15 (серый) – 2,5 мг/л БАП+2 мг/л НУК

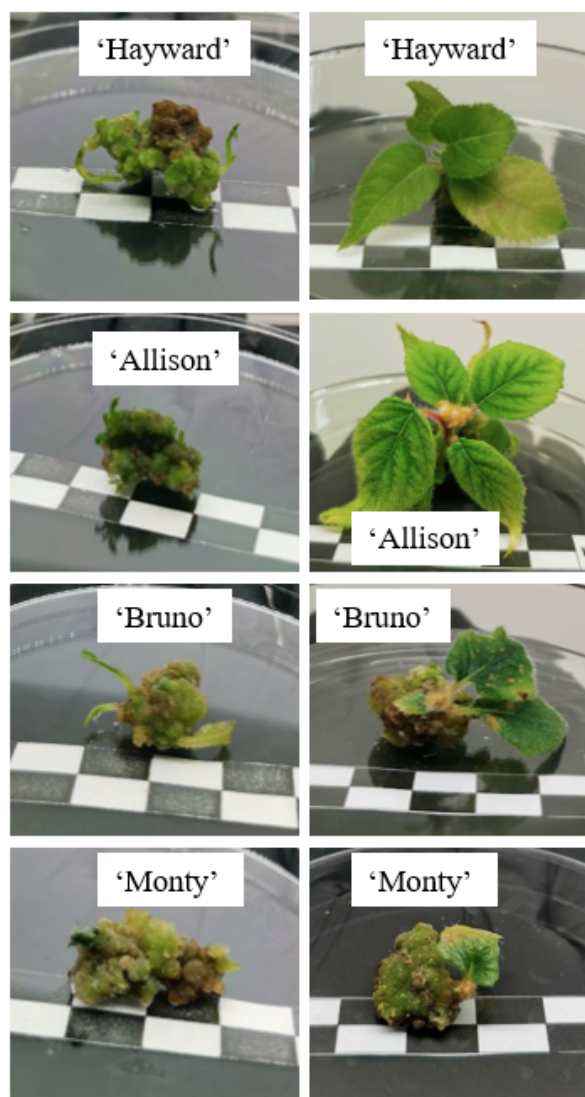
\*a, b, c, d – значимые отличия между средним количеством растений-регенерантов на различных вариантах питательных сред

Fig. 5. Average number of regenerated plants per callus of *Actinidia* accessions

Colors indicate nutrient media: 13 (blue) – 6 mg/L zeatin+0.1 mg/L NUK;

14 (orange) – 3 mg/L zeatin+0.1 mg/L NUK; 15 (gray) – 2.5 mg/L BAP+2 mg/L NUK

\*a, b, c, d – significant differences between the average number of regenerated plants on different nutrient media variants



**Рис. 6. Растения-регенеранты (справа) из каллусной ткани (слева) образцов актинидии**  
**Fig. 6. Regenerated plants (right) from callus tissue (left) of *Actinidia* accessions**

В результате проведенных экспериментов нами подобраны оптимальные условия для регенерации побегов из эксплантов четырех сортов актинидии. В процессе проведения исследований мы фиксировали как адвентивную регенерацию, так и формирование эмбрионного каллуса, способного к регенерации микропобегов. Ранее, в исследовании И.В. Митрофановой (Mitrofanova, 2000), была подчеркнута важность адвентивного побегообразования актинидии непосредственно с листовых дисков, поскольку у регенерантов, полученных из каллусной ткани, отмечался определенный уровень гетерогенности. Через каллусную культуру были получены регенеранты *Haworthia setata* Poelln., отличные по признакам от родительского растения, а также по уровню пloidности: тетраплоиды, анеуплоиды, растения с делецией части сегмента хромосомы, с реципрокными и нерципрокны-

ми транслокациям, а также с хроматидными aberrациями, выявляемыми в мейозе (Ogihara, 1981). Аналогичные данные об индуцированной соматоклональной изменчивости получены и другими авторами на примерах длительно депонированных *in vitro* линий *Rumex acetosa* L. и *Inula britannica* L. (Skaptsov et al., 2012; 2015). С другой стороны, цитологический анализ не выявил изменений в числе хромосом у регенерантов лайма *Citrus acida* Roxb. (сейчас *Citrus aurantiifolia* (Christm.) Swingle), где каллус был получен из нуцелярных семян (Chakravarty, 1999). На соматоклонах чая *Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze в культуре *in vitro* посредством SSR и ISSR анализа полногеномной ДНК также установлен сравнительно низкий процент генетических различий у регенерантов полученных из каллусной ткани при субкультивировании *in vitro* свыше 10 лет (Samarina et al., 2019; Gvasaliya, 2021). Кро-

ме того, было показано, что генетический полиморфизм *R. acetosa* и *I. britannica* на ранних стадиях пролиферации клеток каллуса увеличивался, а уже через несколько месяцев после культивирования и на стадии регенерации восстанавливался (Skaptsov et al., 2012; 2015). Таким образом, явление соматической изменчивости предполагает наличие обязательного сравнения ДНК растений-регенерантов с исходными растениями для детекции наличия изменений или их отсутствия, что мы планируем сделать на следующих этапах исследования. В этом ключе интересным является изучение метилирования ДНК растений и влияние данного процесса на развитие клеточных культур, регуляцию активности меристем, инициацию цветения и полового размножения (Lebedeva et al., 2017).

В данном исследовании мы изучили влияние фитогормонов на различных этапах клонального микроразмножения актинидии, установлен эффективный вариант питательной среды для получения растений-регенерантов ряда сортов, что в последующем может упростить селекционный процесс в том числе и с применением методов агробιοтехнологии.

### Заключение

Таким образом, произведена оценка регенерационного потенциала каллусной ткани сортов актинидии коллекции ВИР. Установлена возможность использования микрорастений актинидии в культуре *in vitro* в качестве источника листовых эксплантов для последующего каллусогенеза и регенерации, в том числе и в случае агробактериальной трансформации. На примере сортов 'Hayward' и 'Allison' показана высокая регенерационная способность каллусной ткани изученных образцов, несмотря на трехлетний период культивирования в условиях *in vitro*. Актуальным видится дальнейшее изучение полученных растений-регенерантов на предмет генетической однородности по сравнению с исходным растительным материалом. Также интересным будет разработка методологических основ криоконсервации гермоплазмы актинидии в парах жидкого азота с целью длительного хранения ценного растительного материала для дальнейших исследований. Полученные результаты, несомненно, являются значимым вкладом в селекционную программу по получению зимостойких сортов актинидии с хорошими показателями качества плодов и пригодных для выращивания в умеренном климате России.

### References/Литература

Aiba L.Ya. Kiwi culture in the subtropical zone of Abkhazia (Kul'tura kivi v subtropicheskoy zone Abhazii). *Horticulture and viticulture*. 2004;(5):22-24. [in Russian] (Айба Л.Я. Культура киви в субтропической зоне Абхазии. *Садоводство и виноградарство*. 2004;(5):22-24).

Chakravarty B. Plantlet regeneration from long-term callus cultures of *Citrus acida* Roxb. and the uniformity of regenerated plants. *Scientia Horticulturae*. 1999;82(1):159-169. DOI: 10.1016/S0304-4238(99)00047-3

Corsi B., Riccioni L., Forni C. *In vitro* cultures of *Actinidia deliciosa* (A. Chev) C.F. Liang & A.R. Ferguson: A tool to study the SAR induction of chitosan treatment. *Organic Agriculture*. 2014;5(3):189-198. DOI: 10.1007/s13165-014-0087-x

Dydykin A.S., Aslamova M.A. Functional nutrition – a new concept of a healthy lifestyle (Funktsional'noye pitaniye – novaya kontseptsiya zdorovogo obraza zhizni). *Agritechnics and technologies*. 2016;(3):43. [in Russian] (Дыдыкин А.С., Асланова М.А. Функциональное питание – новая концепция здорового образа жизни. *Агротехника и технологии*. 2016;(3):43).

FAOSTAT. The Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations. Domains: Production. Items: Aggregated. Fruit primary. Available from: <https://www.fao.org/faostat/ru/#data/QCL/visualize> [accessed November 18, 2024].

Federal Scientific and Technical Program for the Development of Agriculture for 2017-2030. Resolution of the Government of the Russian Federation of August 25, 2017 No. 996 "On approval of the Federal Scientific and Technical Program for the Development of Agriculture for 2017-2030". (Federal'naya nauchno-tekhnicheskaya programma razvitiya sel'skogo hozyaistva na 2017-2030 gody. Postanovleniye Pravitel'stva Rossiiskoy Federatsii ot 25 avgusta 2017 g. №996 "Ob utverzhdenii Federal'noy nauchno-tekhnicheskoy programmy razvitiya sel'skogo hozyaistva na 2017-2030 gody"). 2017. [in Russian] (Федеральная научно-техническая программа развития сельского хозяйства на 2017-2030 годы. Постановление Правительства Российской Федерации от 25 августа 2017 г. №996 «Об утверждении Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства на 2017-2030 годы»). URL: <https://minobrnauki.gov.ru/about/deps/dkdovssn/> [дата обращения: 24.02.2026].

Fotev Yu.V., Pivovarov V.F., Artemyeva A.M., Kulikov I.M., Goncharova Yu.K., Syso A.I., Goncharov N.P. The concept of creating a Russian national system of functional food products. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2018;22(7):776-783. [in Russian] (Фотев Ю.В., Пивоваров В.Ф., Артемьева А.М., Куликов И.М., Гончарова Ю.К., Сысо А.И., Гончаров Н.П. Концепция создания Российской национальной системы функциональных продуктов питания. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2018;22(7):776-783). DOI: 10.18699/VJ18.421

Gvasaliya M.V. Clonal micropropagation of tea plants (*Thea sinensis* L.) *in vitro* culture. *Horticulture and viticulture*. 2013;(3):20-22. [in Russian] (Гвасалия М.В. Клональное микроразмножение растений чая (*Thea sinensis* L.) в культуре *in vitro*. *Садоводство и виноградарство*. 2013;(3):20-22).

Gvasaliya M.V. Study of the genetic diversity *in vitro* somatic tea clones (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) by SSR and ISSR methods of full genomic DNA analysis. *Fruit growing and viticulture of South Russia*. 2021;69(3):76-85. [in Russian] (Гвасалия М.В. Изучение генетического разнообразия *in vitro* соматических клонов чая (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) методами SSR и ISSR анализа полногеномной ДНК. *Плодоводство и виноградарство Юга России*. 2021;69(3):76-85). DOI: 10.30679/2219-5335-2021-3-69-76-85

Khlestkina E.K., Shumny V.K. Prospects for application of breakthrough technologies in breeding: The CRISPR/Cas9 system for plant genome editing. *Russian Journal of Genetics*. 2016;52(7):774-787. [in Russian] (Хлесткина Е.К., Шумный В.К. Перспективы использования прорывных технологий в селекции: система CRISPR/Cas9 для редактирования генома растений. *Генетика*. 2016;52(7):774-787). DOI: 10.7868/S0016675816070055

Kolbasina E.I. *Actinidia* and magnolia-vine in Russia (biology, introduction, breeding) (Актинидии и лимонник в России (биология, интродукция, селекция). Москва: Россельхозакадемия; 2000. [in Russian] (Колбасина Э.И. Актинидии и лимонник в России (биология, интродукция, селекция). Москва: Россельхозакадемия; 2000).

Kolbasina E.I., Kozak N.V. About the valuable samples of collection *Actinidia arguta*. *Horticulture and viticulture*. 2014;(3):6-11. [in Russian] (Колбасина Э.И., Козак Н.В. О ценных коллекционных образцах актинидии аргута. *Садоводство и виноградарство*. 2014;(3):6-11).

Kolomiets T.M., Malyarovskaya V.I., Gvasaliya M.V., Samarina L.S.,

- Sokolov R.N. Propagation *in vitro* of subtropical, ornamental crops and endemic species of Western Caucasus: developed and improved protocols. *Agricultural biology*. 2014;49(3):49-58. [in Russian] (Коломиец Т.М., Маляровская В.И., Гвасалия М.В., Самарина Л.С., Соколов Р.Н. Микроразмножение *in vitro* субтропических, декоративных культур и эндемиков Западного Кавказа: оригинальные и оптимизированные протоколы. *Сельскохозяйственная биология*. 2014;49(3):49-58).
- Konovalova L.N., Malaeva E.V., Molkanova O.I. Assessment of resource potential and optimization of technology for clonal micropropagation of representatives of the *Actinidiaceae* Van-Tiegh family (Otsenka resursnogo potentsiala i optimizatsiya tekhnologii klonal'nogo mikrorazmnozheniya predstavitelei semeystva *Actinidiaceae* Van-Tiegh). *The Bulletin of KrasGAU*. Krasnoyarsk. 2008;(6):42-46. [in Russian] (Коновалова Л.Н., Малаева Е.В., Молканова О.И. Оценка ресурсного потенциала и оптимизация технологии клонального микроразмножения представителей семейства *Actinidiaceae* Van-Tiegh. *Вестник КрасГАУ*. Красноярск. 2008;(6):42-46).
- Kozak N.V., Temirbekova S.K., Kulikov I.M. *Actinidia colomicta* of VSTISP breeding. *Vestnik of the Russian agricultural science*. 2015;1:43-45. [in Russian] (Козак Н.В., Темирбекова С.К., Куликов И.М. Актинидия коломикта селекции ВСТИСП. *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2015;1:43-45).
- Krakhmaleva I.L., Molkanova O.I., Orlova N.D., Koroleva O.V., Mitrofanova I.V. Plant growth regulators on the micropropagation of *Actinidia* cultivars. *Ciencia e Agrotecnologia*. 2023;47:e008923. DOI: 10.1590/1413-7054202347008923
- Kuluev B.R., Kiryanova O.Yu., Gerashchenkov G.A., Rozhnova N.A., Gumerova G.R., Verzhinina Z.R., Matniyazov R.T., Akhmetzyanova L.U., Knyazev A.V., Mikhaylova E.V., Garafutdinov R.R., Baymiev An.Kh., Gubaydullin I.M., Baymiev Al.Kh., Chemeris A.V. Some novelties in CRISPR/Cas genome editing and related areas. *Biomics*. 2019;11(3):315-343. [in Russian] (Кулуев Б.Р., Кирьянова О.Ю., Геращенко Г.А., Рожнова Н.А., Гумерова Г.Р., Вершинина З.Р., Матниязов Р.Т., Ахметзянова Л.У., Князев А.В., Михайлова Е.В., Гарафутдинов Р.Р., Баймиев А.Х., Губайдуллин И.М., Баймиев Ал.Х., Чемерис А.В. Некоторые новшества в CRISPR/Cas геномном редактировании и в смежных областях. *Биомика*. 2019;11(3):315-343). DOI: 10.31301/2221-6197.bmcs.2019-27
- Latocha P., Jankowski P., Radzanowska J. Genotypic difference in postharvest characteristics of hardy kiwifruit (*Actinidia arguta* and its hybrids), as a new commercial crop. *Food Research International*. 2011;44(7):1936-1945. DOI: 10.1016/j.foodres.2011.01.033
- Lebedeva M.A., Tvorogova V.E., Tikhodeev O.N. Epigenetic mechanisms and their role in plant development. *Russian Journal of Genetics*. 2017;53(10):1057-1071. DOI: 10.1134/S1022795417090083
- Malyarovskaya V.I., Kolomiets T.M., Samarina L.S. Methods of clonal micropropagation and preservation of the species of natural flora and beautifully blooming shrubs in *in vitro* conditions (Metodika klonal'nogo mikrorazmnozheniya i sohraneniya vidov prirodnoy flory i krasivocvetushchih kustarnikov v usloviyakh *in vitro*). Sochi: Federal Research Centre Subtropical Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences; 2020. [in Russian] (Маляровская В.И., Коломиец Т.М., Самарина Л.С. Методика клонального микроразмножения и сохранения видов природной флоры и красивоцветущих кустарников в условиях *in vitro*. Сочи: Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук»; 2020).
- Malyarovskaya V.I., Matskiv A.O., Tutberidze Ts.V. Rhizogenesis induction features of *Actinidia* Lindl. genus representatives *in vitro*. *Subtropical and ornamental horticulture*. 2024;(88):133-145. [in Russian] (Маляровская В.И., Мацькив А.О., Тутберидзе Ц.В. Особенности индукции ризогенеза в условиях *in vitro* представителей рода *Actinidia* Lindl. *Субтропическое и декоративное садоводство*. 2024;(88):133-145). DOI: 10.31360/2225-3068-2024-88-133-145
- Malyarovskaya V.I., Matskiv A.O., Tutberidze Ts.V. Specifics of the influence of cytokinin types and concentrations during micropropagation stage of of the genus *Actinidia* Lindl. representatives. *Subtropical and ornamental horticulture*. 2023;(85):132-143. [in Russian] (Маляровская В.И., Мацькив А.О., Тутберидзе Ц.В. Особенности влияния типов и концентраций цитокининов на этапе микроразмножения представителей рода *Actinidia* Lindl. *Субтропическое и декоративное садоводство*. 2023;(85):132-143). DOI: 10.31360/2225-3068-2023-85-132-144
- Michurin I.V. Essays. Notebooks and diaries (Sochineniya. Zapisnyye knizhki i dnevniki). Vol. 3. Moscow; Leningrad: Selkhozgiz; 1940. [in Russian] (Мичурин И.В. Сочинения. Записные книжки и дневники. Т. 3. Москва; Ленинград: Сельхозгиз; 1940).
- Mitrofanova I.V. Direct regeneration of micro-shoots from leaf disks of kiwi (*Actinidia deliciosa* (Chev.) Liang, Ferguson) in *in vitro* conditions (Prямaya regeneratsiya mikropobegov iz listovykh diskov kivi (*Actinidia deliciosa* (Chev.) Liang, Ferguson) v usloviyakh *in vitro*). *Plant Introduction*. 2000;(1):157-158. [in Russian] (Митрофанова И.В. Прямая регенерация микропобегов из листовых дисков киви (*Actinidia deliciosa* (Chev.) Liang, Ferguson) в условиях *in vitro*. *Интродукция растений*. 2000;(1):157-158).
- Molkanova O., Krakhmaleva I., Kozak N. Genetic resources and features of clonal micropropagation of Far Eastern species of *Actinidia*. In: *BIO Web of Conferences. Dedicated to the 101st anniversary of the discovery of the law of homological series and the 134th anniversary of the birth of N.I. Vavilov; 2021 November 25-26; Saratov, Russia. Vol. 43*. Saratov; 2022. DOI: 10.1051/bioconf/20224303021
- Murashige T., Skoog F. A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiologia plantarum*. 1962;15(3):473-497. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x
- Ogihara Y. Tissue culture in *Haworthia*: Part 4: genetic characterization of plants regenerated from callus. *Theoretical and Applied Genetics*. 1981;60(6):353-363. DOI: 10.1007/BF00264330
- Oliveira M.M., Fraser L.G. *Actinidia* spp. Kiwifruit. In: R.E. Litz (ed.). *Biotechnology of fruit and nut crops*. Wallingford, UK: CAB Publishing; 2005. p.1-27.
- On approval of the Doctrine of food security of the Russian Federation. Decree of the President of the Russian Federation of January 21, 2020 No. 20 (Ob utverzhdenii Doktriny prodovol'stvennoy bezopasnosti Rossiiskoy Federatsii. Ukaz Prezidenta Rossiiskoy Federatsii No. 20 ot 21 yanvarya 2020 g.). 2020. [in Russian] (Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации. Указ Президента Российской Федерации от 21 января 2020 г. №20. 2020). URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45106> [дата обращения: 24.02.2026]
- On the Strategy for scientific and technological development of the Russian Federation. Decree of the President of the Russian Federation of February 28, 2024 No. 145 (O Strategii nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossiiskoy Federatsii. Ukaz rezidenta Rossiiskoy Federatsii No. 145 ot 28 fevralya 2024). 2024. [in Russian] (О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации. Указ Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. № 145. 2024). URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/50358> [дата обращения: 24.02.2026].
- Plekhanova M.N. *Actinidia*, schizandra, honeysuckle (Aktinidiya, limonnik, zhimolost'). Leningrad: Agropromizdat; 1990. [in Russian] (Плеханова М.Н. Актинидия, лимонник, жимолость. Ленинград: Агропромиздат; 1990).
- Plekhanova M.N. Winter-hardy varieties of *Actinidia* for the Northwestern region of the Non-chernozem zone of the RSFSR (Zimostoikiye sorta aktinidii dlya severo-zapadnogo rayona nechernozemnoy zony RSFSR). *Research Bulletin of the N.I. Vavilov Institute of Plant Industry*. 1983;(127):58-61. [in Russian] (Плеханова М.Н. Зимостойкие сорта актинидии для северо-западного района нечерноземной зоны РСФСР. *Научно-технический бюллетень Всесоюзного научно-исследовательского института растениеводства им. Н.И. Вавилова*. 1983;(127):58-61).
- Rakhmangulov R.S. Application of the CRISPR/Cas system for gene editing in ornamental crops. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2022;5(3):33-41. [in Russian] (Рахмангулов Р.С. Применение

- системы CRISPR/Cas для редактирования генов декоративных культур. *Биотехнология и селекция растений*. 2022;5(3):33-41). DOI: 10.30901/2658-6266-2022-3-01
- Rakhmangulov R.S., Barabanov I.V., Erastenkova M.V., Ivanov A.A., Kovalenko T.M., Mezhdina K.M., Petrosyan I.A., Kharchenko A.A., Shaimardanov D.Yu., Shaimardanova E.H., Anisimova I.N., Tikhonova N.G., Ukhatova Yu.V., Khlestkina E.K. The new directions in genetics, breeding and biotechnology of ornamental and berry crops in the N.I. Vavilov Institute of Plant Genetic Resources (VIR). *Biotechnology and plant breeding*. 2022;5(4):65-78. [in Russian] (Рахмангулов Р.С., Барабанов И.В., Ерастенкова М.В., Иванов А.А., Коваленко Т.М., Межина К.М., Петросян И.А., Харченко А.А., Шаймарданов Д.Ю., Шаймарданова Э.Х., Анисимова И.Н., Тихонова Н.Г., Ухатова Ю.В., Хлесткина Е.К. Новые направления в генетике, селекции, биотехнологии декоративных и ягодных культур в ВИР им. Н.И. Вавилова. *Биотехнология и селекция растений*. 2022;5(4):65-78). DOI: 10.30901/2658-6266-2022-4-03
- Rakhmangulov R.S., Malyarovskaya V.I., Samarina L.S., Koninskaya N.G. To the problem of sterilizing explants of wood and fruit crops when introducing into *in vitro* conditions. *Subtropical and ornamental horticulture*. 2018;(64):116-120. [in Russian] (Рахмангулов Р.С., Маляровская В.И., Самарина Л.С., Конинская Н.Г. К вопросу стерилизации эксплантов древесных и плодовых культур при введении в условия *in vitro*. *Субтропическое и декоративное садоводство*. 2018;(64):116-120).
- Rakhmangulov R.S., Tikhonova N.G. Breeding of ornamental plants in Russia. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2021;4(4):40-54. [in Russian] (Рахмангулов Р.С., Тихонова Н.Г. Селекция декоративных растений в России. *Биотехнология и селекция растений*. 2021;4(4):40-54). DOI: 10.30901/2658-6266-2021-4-04
- Rakhmatullina S.R., Fedyayev V.V., Talipov R.F., Rakhmankulova Z.F. The effect of Rifal chemical on the morphophysiological parameters of wheat seedlings with normal and deficient mineral nutrition (Vliyaniye preparata riftal na morfofiziologicheskie parametry prorostrkov pshenitsy pri normal'nom i defitsitnom mineral'nom pitanii). *Agricultural chemistry*. 2007;(5):42-48. [in Russian] (Рахматуллина С.Р., Федяев В.В., Талипов Р.Ф., Рахманкулова З.Ф. Влияние препарата рифтал на морфофизиологические параметры проростков пшеницы при нормальном и дефицитном минеральном питании. *Агрохимия*. 2007;(5):42-48).
- Revilla M.A., Power J.B. Morpho-genetic potential of long-term callus cultures of *Actinidia deliciosa*. *The Journal of Horticultural Sciences*. 1988;63:541-545.
- Ryndin A.V., Tutberidze Ts.V., Grebenyukov S.N., Gryazev V.A. Influence of growth stimulators on *Actinidia deliciosa* vegetative micropropagation in Russian subtropics. *Agricultural biology*. 2014;49(3):59-69. [in Russian] (Рындин А.В., Тутберидзе Ц.В., Гребенюков С.Н., Грязев В.А. Вегетативное размножение *Actinidia deliciosa* в условиях субтропиков России при применении стимуляторов роста. *Сельскохозяйственная биология*. 2014;49(3):59-69).
- Samarina L.S., Gvasaliya M.V., Koninskaya N.G., Rakhmangulov R.S., Efremov A., Kiselyova N., Ryndin A.V., Hanke M.-V. A comparison of genetic stability in tea [*Camellia sinensis* (L.) Kuntze] plantlets derived from callus with plantlets from long-term *in vitro* propagation. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 2019;138(3):467-474.
- Skaptsov M.V., Belkin D.L., Smirnov S.V., Kutsev M.G. Somaclonal variation of Elecampane, *Inula britannica* L. in culture *in vitro*. *Turczaninowia*. 2015;18(4):41-48. [in Russian] (Скапцов М.В., Белкин Д.Л., Смирнов С.В., Куцев М.Г. Соматоклональная изменчивость девясила британского – *Inula britannica* L. в культуре *in vitro*. *Turczaninowia*. 2015;18(4):41-48). DOI: 10.14258/turczaninowia.18.4.5
- Skaptsov M.V., Kutsev M.G. Changing *Rumex acetosa* L. caryotype in the culture *in vitro* against the background of the somaclonal variation phenomenon *Izvestiya of Altai State University Journal*. 2012;3(2):57-59. [in Russian] (Скапцов М.В., Куцев М.Г. Изменения кариотипа *Rumex acetosa* L. в культуре *in vitro* на фоне явления соматоклональной изменчивости. *Известия алтайского государственного университета*. 2012;3(2):57-59).
- Strygina K.V., Khlestkina E.K. Wheat, barley and maize genes editing using the CRISPR/Cas system. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2020;3(1):46-56. [in Russian] (Стрыгина К.В., Хлесткина Е.К. Редактирование генов пшеницы, ячменя и кукурузы с использованием системы CRISPR/Cas. *Биотехнология и селекция растений*. 2020;3(1):46-56). DOI: 10.30901/2658-6266-2020-1-02
- Talipov R.F., Gaisin A.M., Safarov M.G., Safullina Z.N., Rakhmankulov D.L., Zorin V.V., Musavirov R.S., Bazunova G.G. Plant Growth Stimulator: Patent RU 2127053 C1; 10.03.1999. №95117735/04, 18.10.1995. [in Russian] (Талипов Р.Ф., Гайсин А.М., Сафаров М.Г., Сафиуллина З.Н., Рахманкулов Д.Л., Зорин В.В., Мусавиров Р.С., Базунова Г.Г. Стимулятор роста растений: Патент на изобретение RU 2127053 C1, 10.03.1999. Заявка №95117735/04 от 18.10.1995). URL: <https://patents.google.com/patent/RU2127053C1/ru> [дата обращения: 13.10.2025].
- Tarasenko V.I. Cultivation of kiwi in Russia (Vozdelyvaniye kivi v Rossii). St. Petersburg: VIR; 1999. [in Russian] (Тарасенко В.И. Возделывание киви в России. Санкт-Петербург: ВИР; 1999).
- Tikhonova N.G., Khlestkina E.K. Genetic editing for improvement of fruit and small fruit crops. *Horticulture and viticulture*. 2019;(44):10-15. [in Russian] (Тихонова Н.Г., Хлесткина Е.К. Генетическое редактирование для улучшения плодовых и ягодных культур. *Садоводство и виноградарство*. 2019;(44):10-15). DOI: 10.31676/0235-2591-2019-4-10-15
- Tutberidze Ts.V. The growth and development of kiwi varieties in the subtropics of Russia (Rost i razvitie sortov kivi v subtropikakh Rossii). *Subtropical and ornamental horticulture*. 2004;(39-2):474-486. [in Russian] (Тутберидзе Ц.В. Рост и развитие сортов киви в субтропиках России. *Субтропическое и декоративное садоводство*. 2004;(39-2):474-486).
- Tutberidze Ts.V., Besedina T.D., Dobezhina S.V. Estimation of *Actinidia deliciosa* cultivars (kiwi) adaptive potential in Russian subtropics. *Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University*. 2012;(80):47-58. [in Russian] (Тутберидзе Ц.В., Беседина Т.Д., Добежина С.В. Оценка адаптивного потенциала сортов *Actinidia deliciosa* (киви) в субтропиках России. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2012;(80):47-58). URL: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_17904327\\_89301736.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_17904327_89301736.pdf) [дата обращения: 24.02.2026].
- Ukhatova Yu.V., Erastenkova M.V., Korshikova E.S., Krylova E.A., Mikhailova A.S., Semilet T.V., Tikhonova N.G., Shvachko N.A., Khlestkina E.K. Improvement of crops using the CRISPR/Cas system: new target genes. *Molecular biology*. 2023;57(3):387-410. [in Russian] (Ухатова Ю.В., Ерастенкова М.В., Коршикова Е.С., Крылова Е.А., Михайлова А.С., Семилет Т.В., Тихонова Н.Г., Швачко Н.А., Хлесткина Е.К. Улучшение культурных растений при помощи системы CRISPR/Cas: новые гены-мишени. *Молекулярная биология*. 2023;57(3):387-410). DOI: 10.31857/S0026898423030151
- Wang T., Atkinson R., Janssen B. The choice of agrobacterium strain for transformation of kiwifruit. *Acta Horticulturae*. 2007;(753):227-232. DOI: 10.17660/ActaHortic.2007.753.26
- Yamaleyeva A.A., Talipov R.F., Ibragimov R.I., Sakayeva A.G. Action of Rifal on fractional composition of protein of seeds and optical properties CPC of plants. *Bulletin of Bashkir State University*. 2004;9(3):96-99. [in Russian] (Ямалеева А.А., Талипов Р.Ф., Ибрагимов Р.И., Сакаева А.Г. Исследование действия рифтала на фракционный состав белков семян и оптические свойства ХБК растений. *Вестник Башкирского университета*. 2004;9(3):96-99).
- Yudina R.S., Gordeeva E.I., Shoeva O.Yu., Tikhonova M.A., Khlestkina E.K. Anthocyanins as components of functional nutrition. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2021;25(2):178-189. [in Russian] (Юдина Р.С., Гордеева Е.И., Шоева О.Ю., Тихонова М.А., Хлесткина Е.К. Антоцианы как компоненты функционального питания. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2021;25(2):178-189). DOI: 10.18699/VJ21.022

---

### *Информация об авторах*

**Руслан Султанович Рахмангулов**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, заведующий, лаборатория генетики, селекции и биотехнологии декоративных и ягодных культур, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44, r.rakhmangulov@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1200-3113>

**Надежда Геннадьевна Тихонова**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, заведующая, отдел генетических ресурсов плодовых и ягодных культур, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44, n.g.tikhonova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7098-7662>

**Александр Александрович Иванов**, младший научный сотрудник, лаборатория генетики, селекции и биотехнологии декоративных и ягодных культур, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44, a.ivanov@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9055-0986>

**Мария Викторовна Ерастенкова**, младший научный сотрудник, лаборатория генетики, селекции и биотехнологии декоративных и ягодных культур, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44, m.erastenkova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7328-437X>

**Ксения Максимовна Межина**, младший научный сотрудник, лаборатория генетики, селекции и биотехнологии декоративных и ягодных культур, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44, k.mezhina@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1587-2608>

**Евгений Владимирович Евдокимов**, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР), Адлерская опытная станция – филиал ВИР, 354340 Россия, Сочи, ул. Ленина, 95; доцент, Сочинский институт (филиал) РУДН, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН), 354376 Россия, Сочи, ул. Куйбышева, 32, agroegen\_77@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-2278-577X>

**Юлия Васильевна Ухатова**, кандидат биологических наук, заместитель директора по научно-организационной работе, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44, u.ukhatova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9366-0216>

**Елена Константиновна Хлесткина**, доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, директор, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. 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*

**Ruslan S. Rakhmangulov**, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Head, Laboratory of Genetics, Breeding, Biotechnology of Ornamental and Berry Crops, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 42, 44, Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190000 Russia, r.rakhmangulov@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1200-3113>

**Nadezhda G. Tikhonova**, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Laboratory of Genetics, Breeding, Biotechnology of Ornamental and Berry Crops, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 42, 44, Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190000 Russia, n.g.tikhonova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7098-7662>

**Aleksandr A. Ivanov**, Junior Researcher, Laboratory of Genetics, Breeding, Biotechnology of Ornamental and Berry Crops, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 42, 44, Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190000 Russia, a.ivanov@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9055-0986>

**Mariya V. Erastenkova**, Junior Researcher, Laboratory of Genetics, Breeding, Biotechnology of Ornamental and Berry Crops, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 42, 44, Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190000 Russia, m.erastenkova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7328-437X>

**Ksenya M. Mezhdina**, Junior Researcher, Laboratory of Genetics, Breeding, Biotechnology of Ornamental and Berry Crops, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 42, 44, Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190000 Russia, k.mezhdina@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1587-2608>

**Evgeny V. Evdokimov**, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), Adler Experiment Station, a branch of VIR, Lenina Street, 95, Sochi, 354340 Russia; Associate Professor, Sochi Institute (branch) RUDN University, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN University), 32, Street Kuibysheva, Sochi, 354376 Russia, agroegen\_77@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-2278-577X>

**Yulia V. Ukhatova**, Cand. Sci. (Biology), Deputy Director for Scientific and Organizational Work, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 42, 44, Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190000 Russia, u.ukhatova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9366-0216>

**Elena K. Khlestkina**, Dr. Sci. (Biology), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, 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 22.10.2025; одобрена после рецензирования 27.02.2026; принята к публикации 20.03.2026.

The article was submitted on 22.10.2025; approved after reviewing on 27.02.2026; accepted for publication on 20.03.2026.

Краткое сообщение  
УДК 575.1:575.2:581.192  
DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-01



## Биологические коллекции для здоровья и долголетия: тренды в использовании генетических ресурсов растений

Е. К. Хлесткина<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное исследовательское учреждение Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Федеральное исследовательское учреждение Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

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

Изучение коллекций генетических ресурсов привело к разработке современных методов биотехнологии. В наше время в условиях накопления больших геномных и омиксных данных биологические коллекции имеют огромное значение для развития персонализированных подходов в медицине и питании. Междисциплинарные комплексные исследования в области здорового питания, базируясь на классической нутрициологии и диетологии, охватывают сегодня нутригеномику человека с применением омиксных подходов, нутрициологические и нутригеномные эксперименты на модельных животных, нутрициологическое фенотипирование генетических ресурсов растений наряду с их биохимическим и метаболомным анализом, а также наукоемкие способы переработки растительного сырья. Подчеркивается, что такой комплексный подход не только является основой важных разработок в сфере персонализированного питания, но и создает перспективу персонализированной селекции растений для рациона человека. Делается акцент на изучении генетических ресурсов культурных растений с геропротекторными свойствами и на значимости биофортификации сортов растений, из которых производят повседневные продукты питания.

**Ключевые слова:** биофортификация, геропротекторные свойства, метаболомика, растительные ресурсы, функциональное питание

**Благодарности:** Статья подготовлена в рамках темы НИР № 0481-2022-0007

**Для цитирования:** Хлесткина Е.К. Биологические коллекции для здоровья и долголетия: тренды в использовании генетических ресурсов растений. *Биотехнология и селекция растений*. 2026;9(1):64-70. DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-01

Прозрачность финансовой деятельности: Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, автору и её месту работы.

© Хлесткина Е.К., 2026

**Brief communication**

DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-01

## Biological collections for health and longevity: trends in the plant genetic resources utilization

Elena K. Khlestkina<sup>1,2</sup><sup>1</sup> N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia<sup>2</sup> Institute of Cytology and Genetics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia**Corresponding author:** Elena K. Khlestkina, director@vir.nw.ru

The study of genetic resource collections has led to the development of modern biotechnology methods. Today, with the accumulation of big data in genomics and omics, biological collections are of paramount importance for the development of personalized approaches in medicine and nutrition. Interdisciplinary comprehensive research in the field of healthy nutrition, based on classical nutrition and dietetics, now encompasses human nutriogenomics using omics approaches, nutritional and nutriogenomic experiments on model animals, nutritional phenotyping of plant genetic resources along with their biochemical and metabolomic analysis, and science-intensive methods for processing plant materials. It is emphasized that such an integrated approach not only forms the basis for important developments in personalized nutrition but also opens the door to personalized plant breeding for the human diet. Emphasis is placed on the study of the genetic resources of cultivated plants with geroprotective properties and the importance of biofortification of plant varieties used in the production of everyday foods.

**Keywords:** biofortification, geroprotective properties, metabolomics, plant resources, functional food

---

**Acknowledgements:** The article was prepared within the framework of research topic No. 0481-2022-0007**For citation:** Khlestkina E.K. Biological collections for health and longevity: trends in the plant genetic resources utilization. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2026;9(1):64-70. (in Russ.). DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-01

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

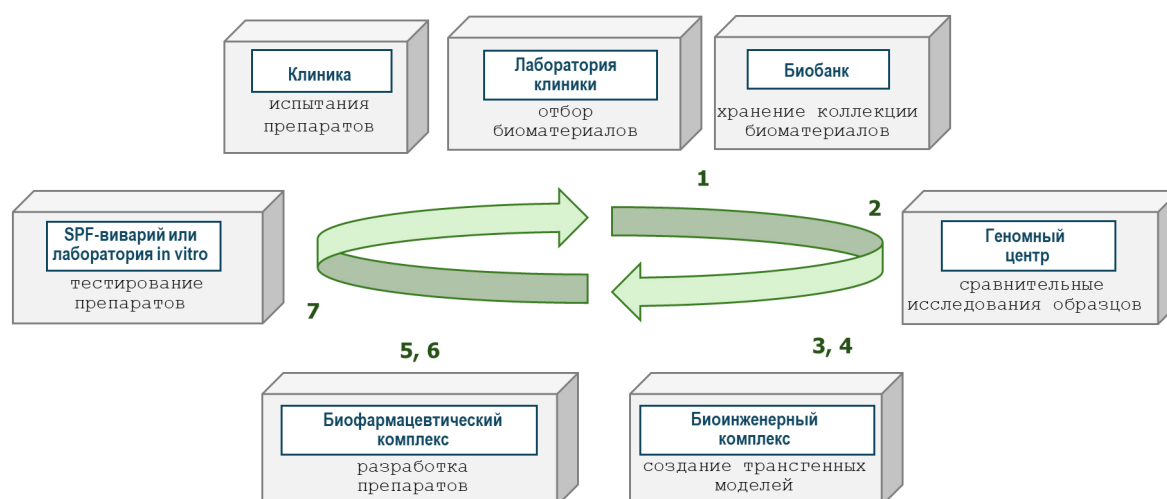
---

© Khlestkina E.K., 2026

Изучение генетических ресурсов микроорганизмов и образцов генетических коллекций растений еще в прошлом веке дало человечеству открытия, которыми сегодня широко пользуются в разных областях – от исследований в области фундаментальной биологии до медицинской диагностики, генотерапии и создания вакцин. Речь о базовых методах биотехнологии. Благодаря открытию эндонуклеаз рестрикции у бактерий (Meselson, Yuan, 1968) стало возможным осуществлять молекулярное клонирование генов любых организмов, а выделение термостойкой бактериальной ДНК-полимеразы (Chien et al., 1976) дало возможность автоматизировать проведение ПЦР. Мобильные элементы генома, сперва открытые у кукурузы, имеющей мозаичную окраску зерна (McClintock, 1950), оказались неотъемлемой частью генома всех эукариот; знания о них широко применяют от транспозонного мечения до разработки различных способов анализа полиморфизма ДНК. Явление генного сайленсинга, установленное при изучении трансгенной петунии (Napoli et al., 1990; van der Krol et al., 1990), привело к расцвету обратной генетики и предложило перспективные методы, подходы в медицине, защите растений и дру-

гих направлениях. И, наконец, уже в нашем веке изучение адаптивного иммунитета у бактерий и архей (Jinek et al., 2012), привели к разработке системы геномного редактирования CRISPR/Cas – относительно доступного способа направленного мутагенеза геномов различных организмов, потенциал которого продолжает раскрываться в различных прикладных направлениях. Наряду с этими общими открытиями, в нашем веке в условиях накопления больших геномных и омиксных данных биологические коллекции имеют огромное значение для развития персонализированных подходов в медицине и питании.

На рисунке 1 представлена схема реализации исследований в области трансляционной медицины, на основе которой развиваются персонализированные подходы в лечении заболеваний. В этом цикле задействованы не только биоматериал человека, но и коллекции лабораторных животных, коллекции культуры клеток позвоночных, коллекции микроорганизмов, и, наконец, коллекции лекарственных растений – источников природных веществ, обладающих полезными фармакологическими свойствами (рис. 1).



**Рис. 1. Применение различных типов биологических коллекций, а также биоматериалов человека в цикле трансляционной медицины**

1 – пополнение коллекций биоматериалов человека; 2 – изучение коллекций биоматериалов человека; 3 – создание генетических моделей заболеваний человека; 4 – пополнение коллекций лабораторных животных или коллекций клеточных культур; 5, 6 – применение (в т.ч.) коллекций промышленных микроорганизмов для синтеза препаратов и коллекций лекарственных растений; 7 – применение коллекций лабораторных животных или коллекций клеточных культур для тестирования препаратов

При детализации схемы использованы сведения из публикаций: Glotov et al., 2022; Gridina et al., 2022, Mikhailova et al., 2025; Smirnov et al., 2024; Tkachenko et al., 2024; Zhang et al., 2022; Pachulia et al., 2024; Tikhonovich et al., 2022

**Fig. 1. The use of various types of biological collections, as well as human biomaterials, in the cycle of translational medicine**

1 – replenishment of human biomaterial collections; 2 – study of human biomaterial collections; 3 – creation of genetic models of human diseases; 4 – replenishment of laboratory animal or cell culture collections; 5, 6 – use (including) of industrial microorganism collections for drug synthesis, and of medicinal plant collections; 7 – use of laboratory animal or cell culture collections for drug testing

To detail the scheme, information from the following publications was used: Glotov et al., 2022; Gridina et al., 2022, Mikhailova et al., 2025; Smirnov et al., 2024; Tkachenko et al., 2024; Zhang et al., 2022; Pachulia et al., 2024; Tikhonovich et al., 2022

Залог активного долголетия – не только персонализированные подходы в медицине, но и здоровое питание. Исследования в этой сфере уже далеко вышли за рамки классической нутрициологии и диетологии, они базируются на современных геномных, омиксных и цифровых подходах. Схема на рисунке 2 отражает взаимосвязь современных комплексных исследований в обла-

сти здорового питания как основу разработки наукоемких подходов в персонализированном питании человека (с акцентом на продукты растительного происхождения – источник разнообразия микроэлементов, витаминов, различных биологически активных веществ) с перспективой персонализированной селекции растений для этих целей.



**Рис. 2. Применение геномных и омиксных подходов и использование биологических (биоресурсных) коллекций в цикле исследований, направленных на развитие персонализированного питания**

**Fig. 2. The application of genomic and omics approaches and the use of biological (bioresource) collections in a cycle of research aimed at the development of personalized nutrition**

Эти междисциплинарные комплексные исследования, базируясь на классической нутрициологии и диетологии (Tutelyan, Nikityuk, 2026), сегодня охватывают новую формирующуюся область – (1) нутригеномику человека с применением для решения ее задач широкого спектра омиксных подходов, (2) нутрициологические и нутригеномные эксперименты на модельных животных – от дрозофилы, до лабораторных мышей и приматов, (3) нутрициологическое фенотипирование генетических ресурсов растений наряду с их биохимическим и метаболомным анализом, (4) наукоемкие способы переработки растительного сырья (Konarev, 2025; Mikhailova et al., 2023, 2026; Tikhonova et al., 2020a; 2020b; 2024; Xiao et al., 2025). Для таких комплексных исследований представляют ценность коллекции генетических ресурсов растений (такие как, например, «Коллекция генетических ресурсов растений ВИР»<sup>1</sup> и «Ампелографическая коллекция «Магарач»»<sup>2</sup>) и коллекции лабораторных живот-

ных (например, «Коллекция генетических линий лабораторных животных»<sup>3</sup> и «Коллекция лабораторных приматов»<sup>4</sup>).

Трудно переоценить роль генетических ресурсов культурных растений во всем их видовом и сортовом разнообразии и богатстве содержащихся в их сырье питательных веществ и биологически активных веществ (БАВ) для развития направлений специализированного питания: детского (Makarov et al., 2009; Tutelyan et al., 2019), спортивного (Nikityuk et al., 2019), питания для космонавтов (Agureev et al., 2017; Tutelyan et al., 2025), функционального питания (Konarev, 2025), других видов специализированных направлений, например нейропитания (Badaeva et al., 2023).

Компоненты для функционального и специализированного питания – это не только БАВ, извлеченные из какого-либо сырья, и применяемые в виде добавок. Биофортификация сортов растений, из которых производят

<sup>1</sup> УНУ №505851 в каталоге ЦКП/УНУ на портале НТИРФ <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/505851/>

<sup>2</sup> ЦКП №463399 в каталоге ЦКП/УНУ на портале НТИРФ <https://ckp-rf.ru/catalog/ckp/463399/>

<sup>3</sup> ЦКП №481507 в каталоге ЦКП/УНУ на портале НТИРФ <https://ckp-rf.ru/catalog/ckp/481507/>

<sup>4</sup> УНУ №4145623 в каталоге ЦКП/УНУ на портале НТИРФ <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/4145623/>

повседневные продукты питания – вот важная основа для современного диетического и функционального питания. Благодаря масштабному изучению Вавиловской коллекции в свое время именно в СССР впервые в мире были развернуты пионерские работы по биохимии культурных растений, по витаминологии. Их возглавил Н.Н. Иванов. Под его руководством были выявлены и рекомендованы производству высоковитаминные биофортифицированные сорта капусты, томатов, картофеля, моркови, черной смородины, яблок и т.п.; именно в результате этих работ шиповник в свое время стал основным сырьем для обогащения рациона витамином С (Конарев, 2025). Сегодня в фокусе масштабных метаболомных и биохимических скринингов находятся образцы Вавиловской коллекции, относящиеся к культурам с геропротекторным потенциалом (Solovyeva et al., 2019; Orlova et al., 2020; Shelenga et al., 2022; Malysheva et al., 2023; Piskunova et al., 2023). Отдельное внимание при изучении коллекций культурных растений уделяется исследованию содержания биологически активных полифенольных соединений, в том числе флавоноидов и антоцианов (Lukina et al., 2021; Drozd et al., 2022). На модельных животных показано увеличение продолжительности жизни модельных животных за счет диеты, обогащенной полифенольными соединениями винограда (Tikhonova et al., 2020b) и антоцианами зерновых культур (Mikhailova et al., 2023).

Для обогащения каждодневного рациона особую ценность представляет генетически запрограммированный высокий уровень функциональных компонентов в сортах зерновых культур. Например, при помощи современных методов селекции для здорового питания создан сорт яровой мягкой пшеницы ‘ЭФ 22’ (Shamanin et al., 2024). Зерно этого сорта богато антоцианами – биофлавоноидами, обладающими высокой антиоксидантной активностью. Антоцианы зерна обладают профилактическим действием в отношении нейродегенеративных и опухолевых заболеваний, улучшают рабочую память (Tikhonova et al., 2020a; 2024). Это лишь отдельный недавний пример комплексного исследования для создания и применения биофортифицированной пшеницы. Другие примеры биофортификации различных зерновых культур и роли коллекций генетических ресурсов растений для этих целей приводятся в обзоре Т.В. Шеленга с соавторами (Shelenga et al., 2021).

Недавний пример междисциплинарного исследования – проведенное в рамках программы «Хлеба России» глубокое изучение влияния диеты с применением образцов различных видов и сортов пшеницы (а также тритикале) из коллекции ВИР на продолжительность жизни, фертильность, физическую активность и стрессоустойчивость на модели дрозофилы (Mikhailova et al., 2026). Примененная оригинальная методология оценки биологического воздействия цельнозерновых (видо- и генотипспецифичных) рационов без декомпозиции состава зерна на макро-, микроэлементы и биологически активные вещества открывает новое направление – нутрици-

ологическое фенотипирование растений для селекции. Это важный шаг к персонализированной селекции сортов растений, предназначенных для здорового питания и долголетия.

Таким образом, биологические коллекции являются основой и важнейшим инструментом комплексных исследований, открывающих новые направления и задающих современные тренды в области здорового долголетия.

## References/Литература

- Agureev A.N., Pavlova L.P., Makarov V.N., Akimov M.Yu., Vlazneva L.N., Koltsov V.A. Assessment of the nutritional status of cosmonauts on diets containing Michurin products (Otsenka pishchevogo statusa kosmonavtov pri pitanii ratsionami s vklucheniym v ikh sostav michurinskikh produktov). In: *Scientific and practical foundations for accelerating import substitution of horticultural products: Proceedings of the scientific and practical conference (Nauchno-prakticheskiye osnovy uskoreniya importozameshcheniya produktiv sadovodstva: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii); 2016 September 7-9, Michurinsk-Science City, Russia*. Michurinsk-Science City; 2017. p. 29-33. [in Russian] (Агуреев А.Н., Павлова Л.П., Макаров В.Н., Акимов М.Ю., Влазнева Л.Н., Кольцов В.А. Оценка пищевого статуса космонавтов при питании рационами с включением в их состав мичуринских продуктов. В кн.: *Научно-практические основы ускорения импортозамещения продукции саводства: материалы научно-практической конференции; 07-09 сентября 2016 г.; Мичуринск-Наукоград, Россия*. Мичуринск-Наукоград; 2017. С.29-33).
- Badaeva A.V., Danilov A.B., Clayton P., Moskalev A.A., Karasev A.V., Tarasevich A.F., Vorobyeva Y.D., Novikov V.N. Perspectives on neuronutrition in prevention and treatment of neurological disorders. *Nutrients*. 2023;15(11):2505. DOI: 10.3390/nul5112505
- Chien A., Edgar D.B., Trela J.M. Deoxyribonucleic acid polymerase from the extreme thermophile *Thermus aquaticus*. *Journal of Bacteriology*. 1976;127(3):1550-1557. DOI: 10.1128/jb.127.3.1550-1557.1976
- Drozd E.V., Babak O.G., Nekrashevich N.A., Anisimova N.V., Nikitinskaya T.V., Yatsevich K.K., Gashkova I.V., Artemyeva A.M., Kilchevsky A.V. Study of anthocyanin accumulation peculiarities in *Solanum melongena* depending on the polymorphism of activator-type R2R3-MYB genes. *Molecular & Applied Genetics Proceedings*. 2022;32:6-17. [in Russian] (Дрозд Е.В., Бабак О.Г., Некрашевич Н.А., Анисимова Н.В., Никитинская Т.В., Яцевич К.К., Гашкова И.В., Артемьева А.М., Кильчевский А.В. Изучение особенностей накопления антоцианов у *Solanum melongena* L. в зависимости от полиморфизма генов R2R3 MYB-активатора. *Молекулярная и прикладная генетика*. 2022;32:6-17). DOI: 10.47612/1999-9127-2022-32-6-17
- Glotov A., Nasykhova Yu., Dvoynova N., Mikhailova A., Pachulia O., Danilova M., Tonyan Z., Barbitoff Yu., Illarionov R., Bepalova O., Baranov V., Kogan I. Prospects for biobanking in reproductive health: genetic aspects. *Biological Communications*. 2022;67(4):286-300. DOI: 10.21638/spbu03.2022.404
- Gridina M.M., Nurislamov A.R., Minina J.M., Karamysheva T.V., Rubtsov N.B., Serov O.L., Lopatkina M.E., Drozdov G.V., Vasilyev S.A., Minaycheva L.I., Belyaeva E.O., Nikitina T.V., Kashevarova A.A., Lebedev I.N. Generation of iPS cell line (ICGi040-A) from skin fibroblasts of a patient with ring small supernumerary marker chromosome 4. *Stem Cell Research*. 2022;61:102740. DOI: 10.1016/j.scr.2022.102740
- Jinek M., Chylinski K., Fonfara I., Hauer M., Doudna J.A., Charpentier E.A. A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity. *Science*. 2012;337(6096):816-821. DOI: 10.1126/science.1225829
- Konarev A.V. Biochemistry of cultivated plants and the global collection of VIR in the context of healthy nutrition issues. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2025;8(1):46-52. [in Russian]

- (Конарев А.В. Биохимия культурных растений и мировая коллекция ВИР в разрезе вопросов здорового питания. *Биотехнология и селекция растений*. 2025;8(1):46-52. DOI: 10.30901/2658-6266-2025-1-04
- Lukina K.A., Shoeva O.Y., Kovaleva O.N., Loskutov I.G. Anthocyanin content in grains of barley and oat accessions from the VIR collection. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2021;4(3):5-14. [in Russian] (Лукина К.А., Шоева О.Ю., Ковалева О.Н., Лоскутов И.Г. Содержание антоцианов в образцах зерновок ячменя и овса из коллекции ВИР. *Биотехнология и селекция растений*. 2021;4(3):5-14). DOI: 10.30901/2658-6266-2021-3-04
- Makarov V.N., Vlazneva L.N., Akimov M.Yu. New fruit and vegetable functional products for school nutrition. *Pediatric Nutrition*. 2009;7(3):62-65. [in Russian] (Макаров В.Н., Влазнева Л.Н., Акимов М.Ю. Новые продукты функционального назначения из плодоовощного сырья для школьного питания. *Вопросы детской диетологии*. 2009;7(3):62-65).
- Malysheva N.Yu., Shelenga T.V., Solovyeva A.E., Nagiev T.B., Kovaleva N.V., Malyshev L.L. Metabolomic approach to investigate *Dactylis glomerata* L. from the VIR collection. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2023;27(2):111-118. DOI: 10.18699/VJGB-23-16
- McClintock B. The origin and behavior of mutable loci in maize. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 1950;36(6):344-355. DOI: 10.1073/pnas.36.6.344
- Meselson M., Yuan R. DNA restriction enzyme from *E. coli*. *Nature*. 1968;217(5134):1110-1104. DOI: 10.1038/2171110a0
- Mikhailova A.A., Bogomiagkova E.S., Nasykhova Yu.A., Illarionov R.A., Danilova M.M., Tonyan Z.N., Chernykh V.B., Kovalenko L.V., Bespalova O.N., Glotov A.S. Healthcare professionals and scientists' collaboration with biobanks: a pilot study on the assessment of knowledge and attitudes toward biospecimen donation. *Frontiers in Medicine*. 2025;12:1497209. DOI: 10.3389/fmed.2025.1497209
- Mikhailova D.V., Shevchenko O.G., Golubev D.A., Platonova E.Y., Zemskaya N.V., Shoeva O.Y., Gordееva E.I., Patov S.A., Shaposhnikov M.V., Khlestkina E.K., Moskalev A.A. Antioxidant properties and geroprotective potential of wheat bran extracts with increased content of anthocyanins. *Antioxidants (Basel)*. 2023;12(11):2010. DOI: 10.3390/antiox12112010
- Mikhailova D.V., Zemskaya N.V., Timusheva N.S., Pakshina N.R., Platonova E.Y., Koval L.A., Schegoleva E.V., Yakovleva D.V., Golubev D.A., Kurkiev K.U., Gadjimagedova M.K., Khlestkina E.K., Shaposhnikov M.V., Moskalev A. Sex-specific effects of cereal-based diets on longevity and healthspan in *Drosophila melanogaster*. *Biogerontology*. 2026;27(2):49. DOI: 10.1007/s10522-026-10395-3
- Napoli C., Lemieux C., Jorgensen R. Introduction of a chimeric chalcone synthase gene into petunia results in reversible co-suppression of homologous genes in trans. *Plant Cell*. 1990;2(4):279-289. DOI: 10.1105/tpc.2.4.279
- Nikityuk D.B., Akimov M.Yu., Kharnikov M.V., Gryazev E.E. Establishment of a consulting and diagnostic center "Health and Sports Nutrition" in Michurinsk-Science City of the Russian Federation, Tambov Region (Sozdaniye konsul'tatsionno-dagnosticheskogo tsentra «Zdorov'ye i sportivnoye pitaniye» v Michurinsk-Naukogradе RF Tambovskoy oblasti). In: *Development of production and scientific potential of the horticulture and nursery industry in the Russian Federation: Proceedings of the scientific and practical conference (Razvitiye proizvodstvennogo i nauchnogo potentsiala otrasli sadovodstva i pitomnikovodstva v Rossiyskoy Federatsii: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii); 2019 September 12-14; Michurinsk, Russia*. Michurinsk; 2019. p. 274-278. [in Russian] (Никитюк Д.Б., Акимов М.Ю., Харников М.В., Грязев Е.Е. Создание консультационно-диагностического центра «Здоровье и спортивное питание» в Мичуринск-Наукограде РФ Тамбовской области. В кн.: *Развитие производственного и научного потенциала отрасли садоводства и питомниководства в Российской Федерации: материалы научно-практической конференции; 12-14 сентября 2019 г.; Мичуринск, Россия*. Мичуринск; 2019. С. 274-278).
- Orlova S.Yu., Yushev A.A., Shelenga T.V. Chemical composition of bird cherry fruits in the Northwestern region of Russia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2020;181(2):65-72. [in Russian] (Орлова С.Ю., Юшев А.А., Шеленга Т.В. Химический состав плодов черемухи в условиях Северо-Западного региона России. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2020;181(2):65-72). DOI: 10.30901/2227-8834-2020-2-65-72
- Pachulia O.V., Illarionov R.A., Vashukova E.S., Postnikova T.B., Maltseva A.R., Popova A.K., Kornushina E.A., Bespalova O.N., Glotov A.S. Strategies for bioresource collection in obstetrics: the experience of the "Genofund" biobank. *Cardiovascular Therapy and Prevention*. 2024;23(11):4193. [in Russian] (Пачулия О.В., Илларионов Р.А., Вашукова Е.С., Постникова Т.Б., Мальцева А.Р., Попова А.К., Корнюшина Е.А., Беспалова О.Н., Глотов А.С. Стратегии создания биоресурсных коллекций в акушерстве: опыт Биобанка "Генофонд". *Кардиоваскулярная терапия и профилактика*. 2024;23(11):4193). DOI: 10.15829/1728-8800-2024-4193
- Piskunova T.M., Shelenga T.V., Ozersky P.V., Solovyeva A.E. Carotenoids and carotenes in the fruits of *Cucurbita maxima*, *C. moschata* and *C. pepo* under the conditions of Northwestern Russia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(1):118-127. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-1-118-127
- Shamanin V.P., Chursin A.S., Morgunov A.I., Shepelev S.S., Kuzmin O.G., Gladkikh M.S., Pozherukova V.E., Khlestkina E.K., Gordееva E.I., Pototskaya I.V. 'EF 22' cultivar of common spring wheat (*Triticum aestivum* L.) (Sort «EF 22» pshenitsy myagkoy yarovoy (*Triticum aestivum* L.)). Russian Federation; Patent No. 13333; 2024). [in Russian] (Шаманин В.П., Чурсин А.С., Моргунов А.И., Шепелев С.С., Кузьмин О.Г., Гладких М.С., Пожерукова В.Е., Хлесткина Е.К., Гордеева Е.И., Потоцкая И.В. Сорт «ЭФ 22» пшеницы мягкой яровой (*Triticum aestivum* L.). Российская Федерация; патент № 13333; 2024).
- Shelenga T.V., Kerv Y.A., Perchuk I.N., Solovyeva A.E., Khlestkina E.K., Loskutov I.G., Konarev A.V. The potential of small grains crops in enhancing biofortification breeding strategies for human health benefit. *Agronomy*. 2021;11(7):1420. DOI: 10.3390/agronomy11071420
- Shelenga T.V., Popov V.S., Konarev A.V., Tikhonova N.G., Tikhonova O.A., Kerv Yu.A., Smolenskaya A.E., Malyshev L.L. Metabolomic profiles of *Ribes nigrum* L. and *Lonicera caerulea* L. from the collection of the N.I. Vavilov Institute in the setting of Northwest Russia. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2022;26(7):630-636. DOI: 10.18699/VJGB-22-77
- Smirnov A., Nurislamov A., Koncevaya G., Serova I., Kabirova E., Chuyko E., Maltseva E., Savoskin M., Zadorozhny D., Svyatchenko V.A., Protopopova E.V., Taranov O.S., Legostaev S.S., Loktev V.B., Serov O., Battulin N. Characterizing a lethal CAG-ACE2 transgenic mouse model for SARS-CoV-2 infection using Cas9-enhanced nanopore sequencing. *Transgenic Research*. 2024;33(5):453-466. DOI: 10.1007/s11248-024-00413-w
- Solovyeva A.E., Shelenga T.V., Artemyeva A.M. The metabolomic approach to the complex biochemical characteristics of cole *Brassica oleracea* L. *Vegetable crops of Russia*. 2019;(4):72-79. [in Russian] (Соловьёва А.Е., Шеленга Т.В., Артемьева А.М. Метаболомный подход к комплексной биохимической характеристике вида капуста огородная *Brassica oleracea* L. *Овощи России*. 2019;(4):72-79). DOI: 10.18619/2072-9146-2019-4-72-79
- Tikhonova M.A., Shoeva O.Yu., Tenditnik M.V., Ovsyukova M.V., Akopyan A.A., Dubrovina N.I., Amstislavskaya T.G., Khlestkina E.K. Evaluating the effects of grain of isogenic wheat lines differing in the content of anthocyanins in mouse models of neurodegenerative disorders. *Nutrients*. 2020a;12:3877. DOI: 10.3390/nu12123877
- Tikhonova M.A., Shoeva O.Y., Tenditnik M.V., Akopyan A.A., Litvinova E.A., Popova N.A., Amstislavskaya T.G., Khlestkina E.K. Antitumor effects of an anthocyanin-rich grain diet in a mouse model of Lewis lung carcinoma. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024;25(11):5727. DOI: 10.3390/ijms25115727
- Tikhonova M.A., Tikhonova N.G., Tenditnik M.V., Ovsyukova M.V., Akopyan A.A., Dubrovina N.I., Amstislavskaya T.G.,

- Khlestkina E.K. Effects of grape polyphenols on the life span and neuroinflammatory alterations related to neurodegenerative Parkinson disease-like disturbances in mice. *Molecules*. 2020b;25(22):5339. DOI: 10.3390/molecules25225339
- Tikhonovich I.A., Geltman D.V., Chernetsov N.S., Mikhailova N.A., Glotov A.S., Khlestkin V.K., Ukhatova Y.V., Zavarzin A.A., Nizhnikov A.A., Khlestkina E.K. On the results of the First Scientific Forum «Genetic Resources of Russia»: prospects for development, research and practical potential of bio-collections. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2022;5(2):38-47. [in Russian] (Тихонович И.А., Гельтман Д.В., Чернецов Н.С., Михайлова Н.А., Глотов А.С., Хлесткин В.К., Ухатова Ю.В., Заварзин А.А., Нижников А.А., Хлесткина Е.К. Об итогах Первого научного форума «Генетические ресурсы России»: перспективы развития, научно-исследовательский и научно-практический потенциал биоресурсных коллекций. *Биотехнология и селекция растений*. 2022;5(2):38-47). DOI: 10.30901/2658-6266-2022-2-04
- Tkachenko A.A., Chagalidis A.I., Maksiutenko E.M., Nasykhova Yu.A., Barbitoff Yu.A., Glotov A.S. Replication of known and identification of novel associations in biobank-scale datasets: a survey using UK Biobank and FinnGen. *Genes*. 2024;15(7):931. DOI: 10.3390/genes15070931
- Tutelyan V.A., Atkov O.Yu., Baranov V.M., Nikityuk D.B. (eds). Space nutritionology (Kosmicheskaya nutritsiologiya). Moscow: DeLi; 2025. [in Russian] (Космическая нутрициология / под ред. В.А. Тутельяна, О.Ю. Атькова, В.М. Баранова, Д.Б. Никитюка. Москва: ДеЛи; 2025).
- Tutelyan V.A., Nikityuk D.B., Kon I.Ya., Pyryeva E.A. (eds). Innovations in child food: annual publication with catalog (Innovatsii v detskom pitanii: yezhegodnoye izdaniye s katalogom). Issue 1. Moscow: Medical Information Agency (MIA); 2019. [in Russian] (Инновации в детском питании: ежегодное издание с каталогом. Вып. 1 / под ред. В.А. Тутельяна, Д.Б. Никитюка, И.Я. Коня, Е.А. Пырковой. Москва: Медицинское информационное агентство (МИА); 2019).
- Tutelyan V.A., Nikityuk D.B. (eds). Nutrition and clinical dietetics: national guidelines (Nutritsiologiya i klinicheskaya diyetologiya: natsional'noye rukovodstvo). 3rd edition revised and enlarged. Moscow: GEOTAR-Media; 2026. [in Russian] (Нутрициология и клиническая диетология: национальное руководство / под ред. В.А. Тутельяна, Д.Б. Никитюка. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: ГЭОТАР-Медиа; 2026). DOI: 10.33029/9704-9592-6-NKD-2026-1-1040
- van der Krol A.R., Mur L.A., Beld M., Mol J.N., Stuitje A.R. Flavonoid genes in petunia: addition of a limited number of gene copies may lead to a suppression of gene expression. *Plant Cell*. 1990;2(4):291-299. DOI: 10.1105/tpc.2.4.291
- Xiao X., Fu L., Zhang Z., Tu Z., Shen N., Fan S. Recent advances in integrating machine learning with omics approaches in food science and nutrition research. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2025;73(47):29998-30025. DOI: 10.1021/acs.jafc.5c08522
- Zhang J., Hansen L.G., Gudich O., Viehrig K., Lassen L.M.M., Schrübbers L., Adhikari K.B., Rubaszka P., Carrasquer-Alvarez E., Chen L., D'Ambrosio V., Lehka B., Haidar A.K., Nallapareddy S., Giannakou K., Laloux M., Arsovska D., Jørgensen M.A.K., Chan L.J.G., Kristensen M., Christensen H.B., Sudarsan S., Stander E.A., Baidoo E., Petzold C.J., Wulff T., O'Connor S.E., Courdavault V., Jensen M.K., Keasling J.D. A microbial supply chain for production of the anti-cancer drug vinblastine. *Nature*. 2022;609(7926):341-347. DOI: 10.1038/s41586-022-05157-3

### **Информация об авторе**

**Елена Константиновна Хлесткина**, доктор биологических наук, член-корреспондент 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 Российской академии наук (ИЦиГ СО РАН), 630090 Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 10, director@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8470-8254>

### **Information about the author**

**Elena K. Khlestkina**, Dr. Sci. (Biology), Corr. Member of the Russian Academy of Sciences, 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 of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ICG SB RAS), 10, Academician Lavrentyev Avenue, Novosibirsk, 630090 Russia, director@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8470-8254>

**Вклад автора:** автор сделал самостоятельный вклад в подготовку публикации.

**Contribution of the author:** the author contributed solely to this article.

**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interests:** the author declares no conflict of interests.

Статья поступила в редакцию 20.12.2025; одобрена после рецензирования 20.01.2026; принята к публикации 22.01.2026.

The article was submitted on 20.12.2025; approved after reviewing on 20.01.2026; accepted for publication on 22.01.2026.

*Plant Biotechnology and Breeding* is a scientific periodical publishing on its pages original research results, review articles, protocols and methods in the field of applied crop biotechnology; works on conventional breeding of food, forage, industrial and other crops combined with in vitro technologies and methods of genomic and marker-oriented breeding, genome editing, distant hybridization, cell and chromosome engineering, as well as brief communications on the results of the work of leading biotechnological and plant breeding conferences and congresses. The journal is published four times a year. The languages of publications: Russian and English. The publications in the journal are free of charge.

Indexed/abstracted by the Russian Science Citation Index on eLIBRARY.RU platform, Scopus, DOAJ, AGRIS, included in the list of publications recognized by the Russian Higher Attestation Commission (VAK RF) when candidate and doctoral dissertations are defended.

<https://biosel.elpub.ru>

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](mailto:pbi@vir.nw.ru)

Языки: русский, английский / Languages: Russian, English

Индексируется в РИНЦ (НЭБ), Scopus, DOAJ, AGRIS, входит в перечень изданий, публикации которых учитываются Высшей аттестационной комиссией России (ВАК РФ) при защите диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук / Indexed/abstracted by the Russian Science Citation Index on eLIBRARY.RU platform, Scopus, 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](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*

Корректоры: *С.В. Шувалов, И.В. Котелкина*

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](mailto:pbi@vir.nw.ru); [i.kotielkina@vir.nw.ru](mailto:i.kotielkina@vir.nw.ru)

**Почтовый адрес редакции**

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

Подписано в печать 27.03.2026.

Дата выхода в свет 31.03.2026.

Формат 70×100<sup>1</sup>/<sub>8</sub>

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 9. Тираж 30 экз. Заказ № 389/3. Бесплатно.

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

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

Отпечатано: ООО «Р-ПРИНТ»

Адрес: 190121, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. Муниципальный  
Округ Коломна, пер. Дровяной, д. 5, литера А, помещ. 1-Н



БИОТЕХНОЛОГИЯ  
И СЕЛЕКЦИЯ  
РАСТЕНИЙ

9(1), 2026