

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 631.52:635.112
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-011



Скрининг скороспелых образцов амаранта коллекции ВИР по аминокислотному составу семян

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

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

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

Актуальность. Амарант – ценная и перспективная культура многоцелевого использования, рекордсмен по содержанию полноценного белка в семенах и листьях. Обладает большим генетическим разнообразием, пластичностью и высокой адаптивной способностью к неблагоприятным условиям среды.

Материалы и методы. Материалом для исследования послужили семена 105 образцов амаранта из коллекции Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР), выделенных в 2024 г. как скороспелые в нетипичных для культуры условиях Северо-Западного региона РФ. Содержание белка определяли по методу Кьельдаля, аминокислотный состав – методом ионообменной хроматографии.

Результаты. В результате исследования определено содержание белка в семенах амаранта, идентифицирован аминокислотный профиль, включающий 17 аминокислот. Установлено, что в целом для зерновых форм амаранта характерна низкая вариабельность содержания белка. Выявлено достоверное превышение его уровня (+9,7%) в группе ультраскороспелых образцов. Показаны различия между группами спелости по содержанию серина, играющего значительную роль в формировании реакции растений на абиотические стрессы. Отмечены межвидовые различия аминокислотного состава семян у видов *Amaranthus cruentus* L. и *A. hypochondriacus* L. В результате скрининга отмечены генотипы, обладающие высоким содержанием белка, отдельных аминокислот, а также обладающие комплексом хозяйственно ценных признаков. Данные образцы рекомендуются для включения в селекционные программы по созданию скороспелых холодостойких сортов зернового амаранта с высоким выходом белка после получения устойчивых показателей хозяйственно ценных признаков в ходе последующего изучения выделившихся в текущем исследовании образцов.

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

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

Для цитирования: Соколова Д.В., Соловьева А.Е., Шеленга Т.В. Скрининг скороспелых образцов амаранта коллекции ВИР по аминокислотному составу семян. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(1):30-39. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-011

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.

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-011

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

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

*N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia***Corresponding author:** Diana V. Sokolova, dianasokol@bk.ru

Background. In recent years, with the growing awareness of the need for health protection among consumers and producers, nutritional trends have also changed, and the interest in functional foods has increased. Amaranth is a valuable and promising multipurpose crop, a record holder in the content of complete protein in seeds and leaves, possessing rich genetic diversity, plasticity, and high adaptability to unfavorable environmental conditions.

Materials and methods. The objective was to assess amino acid profiles in 105 amaranth accessions from the collection of the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), previously identified as early-maturing under the conditions of Northwest Russia, atypical for this crop. Seed protein content was measured by the Kjeldahl method, and amino acid composition was analyzed using ion exchange chromatography.

Results. The protein content of amaranth seeds was quantified, and the amino acid profile that included 17 amino acids was determined. Grain forms of amaranth manifested low variability in protein content. The group of ultra-early accessions showed a significant increase in protein levels (+9.8%). Differences were observed among the maturity groups in the content of serine, which plays a significant role in the formation of plant response to abiotic stresses. Interspecies differences in amino acid composition were recorded for *Amaranthus cruentus* L. and *A. hypochondriacus* L. The screening resulted in identifying genotypes with high protein content, high amounts of individual amino acids, and a set of valuable agronomic traits. Such accessions may be recommended for breeding programs aimed at the development of early cold-resistant cultivars of grain amaranth with high protein content after obtaining stable parameters of agronomic traits during subsequent analyses of the accessions identified in the current study.

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

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

For citation: Sokolova D.V., Solovyeva A.E., Shelenga T.V. Screening of early-maturing amaranth accessions from the VIR collection for the amino acid composition of seeds. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(1):30-39. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-1-011

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

Введение

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

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

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

Большинству семян злаковых культур не хватает нескольких незаменимых аминокислот, что делает их аминокислотный профиль несбалансированным. Поскольку белок амаранта уникален по своему составу, имеются сведения о его использовании для улучшения других культур. К примеру, гены, кодирующие белки амаранта, использовались для создания трансгенных растений мягкой пшеницы, картофеля и кукурузы. В статье A. Raina и A. Datta (Raina, Datta, 1992) сообщалось об успешном клонировании гена *AmA1*, кодирующего белок семян амаранта со сбалансированным аминокислотным составом. Позже данный ген успешно внедрили в картофель, что привело к увеличению общего содержания белка в клубнях на 60% (Chakraborty et al., 2000). Аналогичным образом было увеличено содержание незаменимых аминокислот (лизина, треонина и тирозина) у мягкой пшеницы (Tamás et al., 2009). Ученые из Мексиканского

Центра перспективных исследований (Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN) использовали ДНК 11S-глобулина *A. hypochondriacus* для трансформации генома тропической кукурузы. В результате в семенах кукурузы на 32% увеличилось содержание общего белка (Rascón-Cruz et al., 2003).

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

Материалы и методы

Для анализа аминокислотного состава использовались семена 105 образцов амаранта различного происхождения из коллекции ВИР, выращенные в условиях открытого грунта на опытных полях научно-производственной базы «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» (59°71'11275"N, 30°43032647"E; Пушкин, Санкт-Петербург, РФ) в 2024 г. Видовой состав: *A. cruentus* (75) и *A. hypochondriacus* (30). Образцы отбирались по результатам скрининга зерновых форм как наиболее скороспелые, способные сформировать зрелые семена за 87–114 дней от посева (Sokolova, 2025). Оба вида имеют центрально- и североамериканское происхождение, культивируются главным образом для получения семян, отличаются высокой урожайностью и устойчивостью к абиотическим факторам.

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

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

Метеорологические условия вегетационного периода 2024 г. в целом были благоприятными для роста и развития амаранта. Температура воздуха каждого месяца превышала средние многолетние значения. Величина гидротермического коэффициента за июнь – август составила 1,3, что характеризует прошедший вегетационный период как достаточно влажный (Iopova et al., 2019).

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

Результаты и обсуждение

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

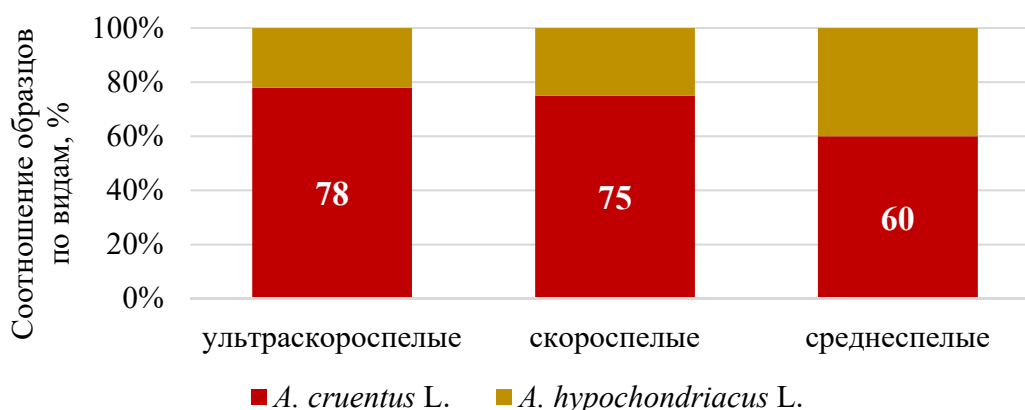


Рис. 1. Видовое соотношение опытных образцов *Amaranthus* L. по группам спелости

Fig. 1. Species ratio of the screened *Amaranthus* L. accessions in the maturity groups

Урожайность

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

Содержание белка

Содержание белка в семенах амаранта в среднем составило 13,92% ($11,51 \pm 16,17\%$). Близкие данные были

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

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

Существенных различий по содержанию белка в соответствии со странами происхождения и видовым составом опытных образцов амаранта не отмечено. Однако в исследованиях M. Segura-Nieto et al. (1994) общее содержание белка имело видовые различия и колебалось от 13,2% до 18,4%, что может быть связано с малым количе-

ством опытных образцов в опыте. Хочется отметить, что статистически значимых различий по содержанию белка у образцов с кремовой и черной окраской семян не выявлено.

Аминокислотный состав

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

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

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

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

Примечание: CV (%) – коэффициент вариации; SD – стандартное отклонение; HCP₀₅ – наименьшая существенная разница; разные буквы указывают на существенные различия по тесту Тьюки HSD ($p < 0,05$)

Note: CV (%) – coefficient of variation; SD – standard deviation; HCP₀₅ – the least significant difference; different letters indicate significant differences according to Tukey's HSD test ($p < 0.05$)

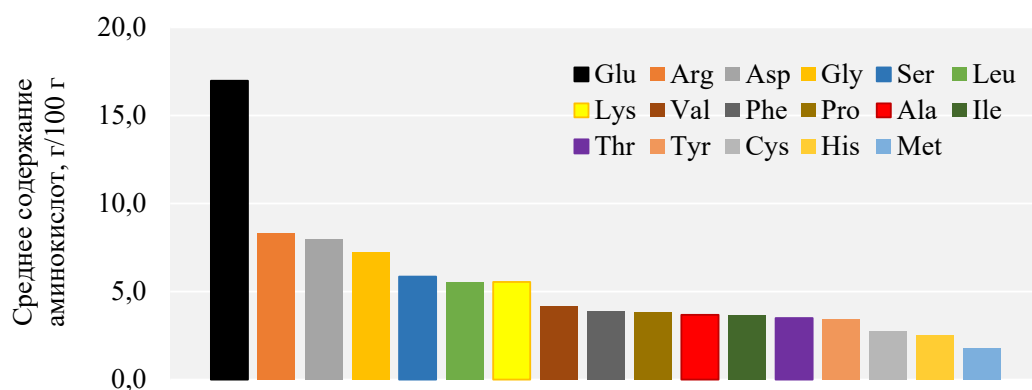


Рис. 2. Аминокислотный профиль опытных образцов амаранта
Fig. 2. The amino acid profile of the screened amaranth accessions

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

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

для развития растений и формирования устойчивости к стрессу (Han et al., 2021).

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

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

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

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

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

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

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

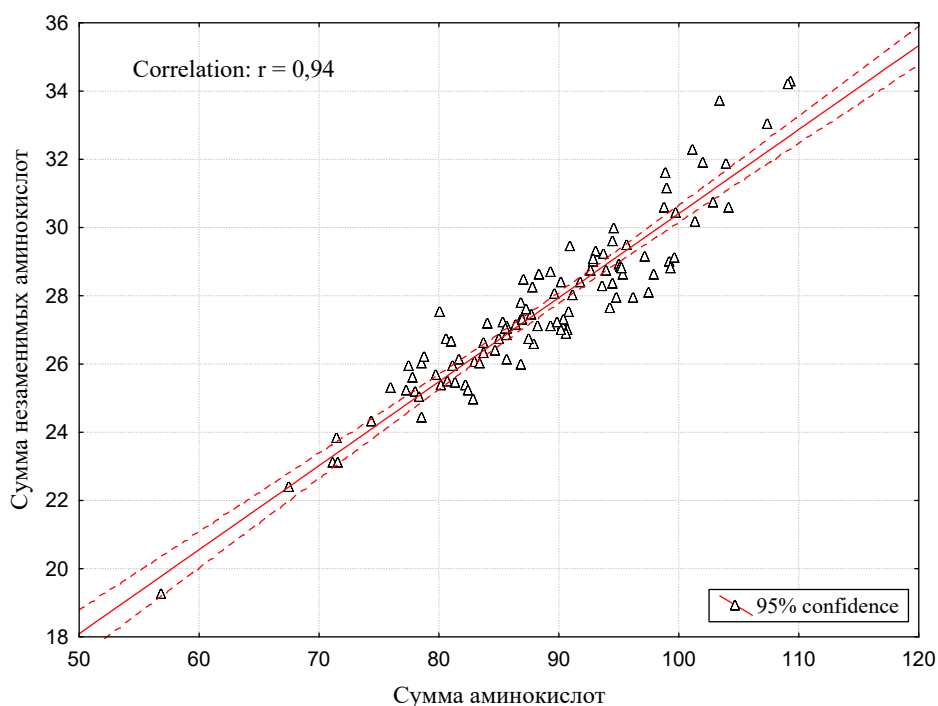


Рис. 3. Взаимосвязь содержания суммы аминокислот и незаменимых аминокислот в семенах амаранта

Fig. 3. Interplay between the sums of total amino acids and essential amino acids in amaranth seeds

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

Анализ межвидовых различий показал, что образцы вида *A. cruentus* по ряду аминокислот достоверно превышали *A. hypochondriacus* (табл. 3). Примечательно повы-

шенное содержание ряда незаменимых аминокислот у генотипов вида *A. cruentus*. Этот факт заслуживает внимания селекционеров при создании сортов амаранта с высоким содержанием незаменимых аминокислот в семенах.

Наиболее ценные образцы амаранта

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

Таблица 3. Аминокислотный состав семян опытных видов амаранта

Table 3. Amino acid composition in the seeds of the studied amaranth species

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

Таблица 3. окончание

Table 3. The end

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

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

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

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

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

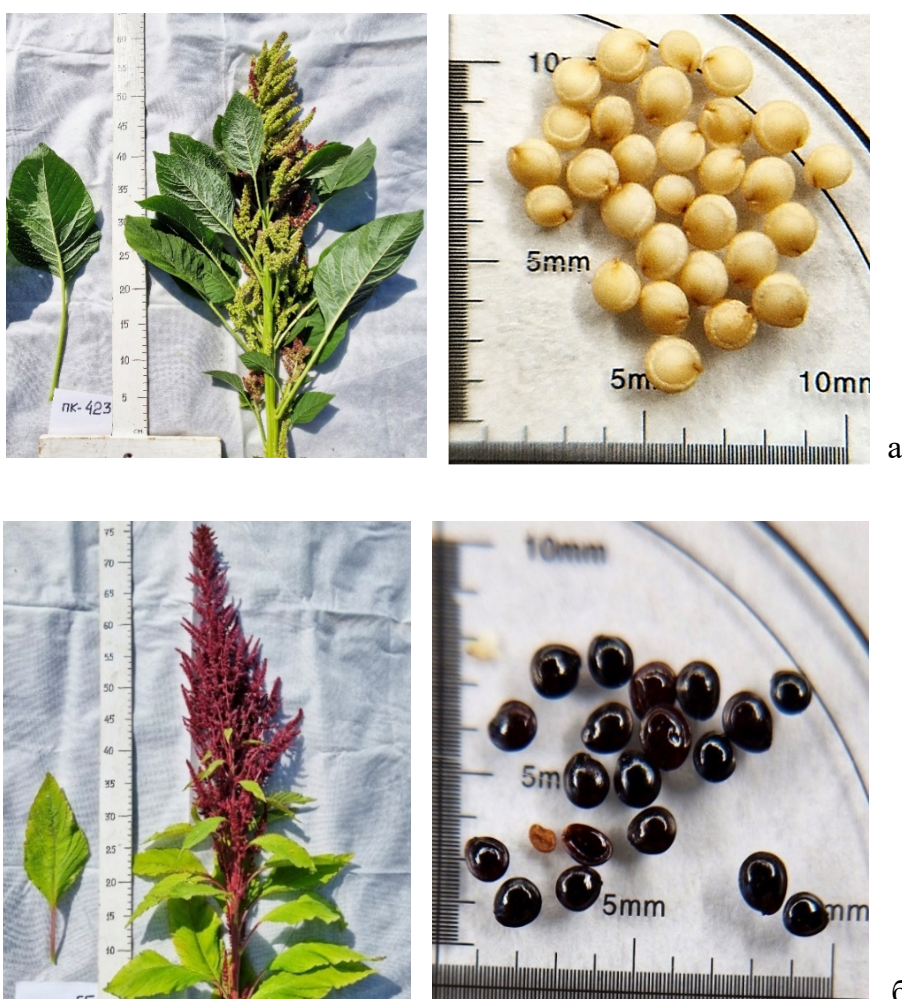


Рис. 4. Соцветие и семена образцов *Amaranthus cruentus* L. (пк-423, Мексика) (а) и *A. cruentus* L. (пк-55, Узбекистан) (б)

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

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

Выводы

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

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

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

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

References / Литература

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

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

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

Chakraborty S., Chakraborty N., Datta A. Increased nutritive value of transgenic potato by expressing a nonallergenic seed albumin gene from *Amaranthus hypochondriacus*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United*

States of America. 2000;97(7):3724-3729. DOI: 10.1073/pnas.050012697

Covas G. Publicación miscelánea N° 13: Perspectivas del cultivo de los amarantos en la República Argentina. Anguil: Estación Experimental Agropecuaria; 1994. [in Spanish]

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- Nutrition*. 2013;53(2):109-125. DOI: 10.1080/10408398.2010.517876
- Rivelli A.R., Gherbin P., De Maria S., Pizza S. Field evaluation of *Amaranthus* species for seed and biomass yields in southern Italy. *Italian Journal of Agronomy*. 2008;3(3):225-229. DOI: 10.4081/ija.2008.225
- Ros R., Muñoz-Bertomeu J., Krueger S. Serine in plants: biosynthesis, metabolism, and functions. *Trends in Plant Science*. 2014;19(9):564-569. DOI: 10.1016/j.tplants.2014.06.003
- Sá A.G.A., Moreno Y.M.F., Carciofi B.A.M. Plant proteins as high-quality nutritional source for human diet. *Trends in Food Science and Technology*. 2020;97:170-184. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.01.011
- Segura-Nieto M. Biochemistry of amaranth proteins. In: O. Paredes-López (ed.). *Amaranth Biology, Chemistry, and Technology*. Boca Raton, FL: CRC Press; 1994. p.73-105. DOI: 10.1201/9781351069601
- Sokolova D., Zvereva O., Shelenga T., Solovieva A. Comparative characteristics of the amino acid composition in amaranth accessions from the VIR collection. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 2021;45(1):68-78. DOI: 10.3906/tar-2007-7
- Sokolova D.V. The potential of the VIR grain amaranth collection for cultivation in the northern regions. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*. 2025;25(2):e52252527. DOI: 10.1590/1984-70332025v25n2a07
- State register of varieties and hybrids of agricultural plants admitted for usage (national list): official publication. Moscow: Rosinformagrotech; 2024. [in Russian] [Государственный реестр сортов и гибридов сельскохозяйственных растений, допущенных к использованию: официальное издание. Москва: Росинформагротех; 2024]. URL: <https://mcx.gov.ru/upload/iblock/3bf/zcvfsva67n3wntuboag3pnkzrt4xwnof.pdf> [дата обращения: 24.09.2025].
- Szabóová M., Záhorský M., Gažo J., Geuens J., Vermoesen A., D'Hondt E. et al. Differences in seed weight, amino acid, fatty acid, and squalene content in γ -irradiation-developed and commercial amaranth varieties (*Amaranthus* spp.). *Plants (Basel)*. 2020;9(11):1412. DOI: 10.3390/plants9111412
- Tamás C., Kisgyörgy B.N., Rakszegi M., Wilkinson M.D., Yang M.S., Láng L. et al. Transgenic approach to improve wheat (*Triticum aestivum* L.) nutritional quality. *Plant Cell Reports*. 2009;28(7):1085-1094. DOI: 10.1007/s00299-009-0716-0
- Toader M., Ionescu A.M., Şonea C., Georgescu E. Research on the morphology, biology, productivity and yields quality of the *Amaranthus cruentus* L. in the southern part of Romania. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 2020;48(3):1413-1425. DOI: 10.15835/nbha48311973
- Tömösközi S., Baracska I., Schönlechner R., Berghofer E., Lásztity R. Comparative study of composition and technological quality of amaranth. I. Gross chemical composition, amino acid and mineral content. *Acta Alimentaria*. 2009;38(3):341-347. DOI: 10.1556/aalim.38.2009.3.8
- Vendemiatti A., Ferreira R.R., Gomes L.H., Medici L.O., Azevedo R.A. Nutritional quality of sorghum seeds: storage proteins and amino acids. *Food Biotechnology*. 2008;22(4):377-397. DOI: 10.1080/08905430802463487

Информация об авторах

Диана Викторовна Соколова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, dianasokol@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9967-7454>

Алла Евгеньевна Соловьева, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, alsol64@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6201-4294>

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

Information about the authors

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

Alla E. Solovyeva, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, alsol64@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6201-4294>

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

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

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

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