

КОЛЛЕКЦИИ МИРОВЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СЕЛЕКЦИИ

Научная статья
УДК 633.13:58.051
DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-129-138



Изучение разнообразия алюмоустойчивости образцов овса из коллекции ВИР

И. Г. Лоскутов^{1,2}, Е. В. Блинова¹, Л. Ю. Новикова¹

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

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

Автор, ответственный за переписку: Елена Владимировна Блинова, e.blinova@vir.nw.ru

Актуальность. Овес является важной продовольственной и кормовой зерновой культурой в России. Площади посевов овса составляют в мире 10 млн га, в нашей стране – 3 млн га. Несмотря на высокую экологическую пластичность овса, важным условием получения высоких урожаев является создание новых сортов с устойчивостью к неблагоприятным факторам внешней среды, в том числе к металлотоксичности и повышенной кислотности почв. Цель работы – поиск устойчивых к неблагоприятным почвенным факторам (избыток ионов H^+ и Al^{3+}) сортов для использования в селекции на эдафическую устойчивость.

Материалы и методы. Материалом для исследований служили 687 сортов (образцов) овса из коллекции генетических ресурсов растений ВИР. Лабораторную оценку алюмотолерантности образцов овса проводили на начальных этапах роста и развития с использованием метода учета прироста корешков после стрессорного воздействия алюминия. Математически доказана воспроизводимость использованной модификации метода.

Результаты и обсуждение. Показано значительное варьирование изученного признака между образцами. Определены регионы – источники ценных генов алюмоустойчивости культуры. Среди изученных образцов овса выделены алюмотолерантные сорта. Они могут быть использованы в селекционном процессе на продуктивность и эдафическую устойчивость для создания сортов овса.

Ключевые слова: *Avena sativa* L., подвижный алюминий, отрастание корешков, алюмотолерантность

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту № FGEM-2022-0009 «Структурирование и раскрытие потенциала наследственной изменчивости мировой коллекции зерновых и крупяных культур ВИР для развития оптимизированного генбанка и рационального использования в селекции и растениеводстве».

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Лоскутов И.Г., Блинова Е.В., Новикова Л.Ю. Изучение разнообразия алюмоустойчивости образцов овса из коллекции ВИР. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(1):129-138. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-129-138

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

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-129-138

Evaluation of aluminum tolerance diversity in *Avena sativa* L. from the VIR collection

Igor G. Loskutov^{1,2}, Elena V. Blinova¹, Liubov Yu. Novikova¹

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

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

Corresponding author: Elena V. Blinova, e.blinova@vir.nw.ru

Background. Oat is an important food and feed cereal crop in Russia. The area under oats is 10 million ha worldwide, and 3 million ha in Russia. Acid soils with excessive content of exchangeable aluminum occupy almost every third hectare in the ex-USSR territory. Oats are relatively resistant to unfavorable soil factors. Among cereal crops, oat is second only to rye and triticale in terms of resistance to exchangeable Al forms. Despite the crop's high environmental plasticity, an important condition for obtaining sustainable oat yields is the development of new cultivars with resistance to adverse environmental factors, including metal toxicity and high soil acidity. The objective of this work was to search for oat cultivars resistant to soil stressors (excess of H⁺ and Al³⁺) for use in breeding for edaphic resistance.

Materials and methods. The research material included 687 oat accessions from the VIR global plant genetic resources collection. The accessions underwent laboratory evaluation of their aluminum tolerance at the initial growth and development stages using the method of measuring radicle growth after the exposure to aluminum stress. Reproducibility of the used modification of the method was mathematically proved.

Results and discussion. Significant variation in the resistance to the studied stressor was observed among the accessions. The regions acting as sources of valuable aluminum resistance genes were identified for the crop. The accessions selected for their high resistance to exchangeable aluminum can be used in breeding programs to develop high-yielding oat cultivars with edaphic resistance.

Keywords: oat, exchangeable aluminum, radicle growth, aluminum tolerance

Acknowledgements: the research was performed within the framework of the state task according to the theme plan of VIR, Project No. FGEM-2022-0009 "Structuring and disclosing the potential of hereditary variation in the global collection of cereal and groat crops at VIR for the development of an optimized genebank and its sustainable utilization in plant breeding and crop production".

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Loskutov I.G., Blinova E.V., Novikova L.Yu. Evaluation of aluminum tolerance diversity in *Avena sativa* L. from the VIR collection. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(1):129-138. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-129-138

Введение

Неблагоприятные эдафические условия, помимо погодных условий, являются одним из лимитирующих факторов внешней среды. Зерновые культуры характеризуются разнообразной реакцией на эдафический стресс, что в свою очередь влияет на общую адаптивность растений. Условия, связанные с повышенной кислотностью почвы и накоплением токсичных ионов алюминия, являются одними из лимитирующих факторов окружающей среды. Они влияют на физиологические и биохимические процессы в корнях, что сказывается на поступлении основных элементов питания в растение, а также на продолжительности прохождения отдельных фаз развития и всего вегетационного периода, на формировании отдельных элементов продуктивности и в конечном счете на общей продуктивности растений (Aniol, 1997; Nava et al., 2006; Silva, 2012; Gupta et al., 2013; Zhao, Shen, 2018).

Кислые почвы с избыточным содержанием подвижного алюминия занимают на территории Российской Федерации почти каждый третий гектар. Овес посевной проявляет относительную устойчивость к неблагоприятным почвенным факторам. Он менее требователен к плодородию почвы, чем пшеница и ячмень, и может произрастать на супесчаных, глинистых и торфянистых почвах. Также посевной овес меньше других зерновых культур сокращает свою продуктивность при различном уровне кислотности, а некоторые сорта могут произрастать в засушливых условиях и на засоленных почвах, что обеспечивает ему распространение во многих сельскохозяйственных регионах мира (Rodionova et al., 1994). По устойчивости к подвижному алюминию среди зерновых культур овес не превосходит только рожь и тритикале. Тем не менее оптимум pH почвенного раствора для культивирования овса составляет 5,0–7,7, а избыток подвижного алюминия в кислой почве приводит к существенному уменьшению зерновой продуктивности у данной культуры (Nettevich, 1976).

В связи с этим выведение кислотоустойчивых сортов овса – одно из важнейших направлений селекции. Как известно, такие сорта способны в наибольшей степени усваивать труднодоступные элементы почвы и требуют меньших доз извести и минеральных удобрений при их выращивании (Avdonin, 1972).

Идентификация генов толерантности к алюминию у овса не проводилась. Однако при работе с другими зерновыми культурами было установлено, что гены толерантности к алюминию у пшеницы были локализованы в плечах хромосом 6AL, 7AS, 2DL, 3DL, 4DL и 4BL и на хромосоме 7D. Основные гены толерантности у ржи, по-видимому, расположены на 3R и 6RS, а другие гены – на 4R. Экспрессия этих генов, расположенных на хромосомах ржи, при скрещивании с пшеницей часто подавлялась действием неустановленных генов на фоне генома пшеницы (Aniol, Gustafson, 1984).

Поиск новых источников толерантности к алюминию у диких видов культурных растений приобретает особое значение, так как эти признаки, первоначально присущие диким предкам, утратились культурными видами в ходе эволюции. Исследования диких видов овса установили, что виды с С-геномом (диплоидные и тетраплоидные) имели низкий уровень алюмотолерантности, тогда как виды с А-геномом с разным уровнем пloidности чаще показывали высокую толерантность. Самая большая группа толерантных форм среди

диких видов овса принадлежала к гексаплоидам (Loskutov et al., 2017).

Для более детального изучения культурных видов овса на толерантность к алюминию применялись молекулярно-генетические методы. С использованием RFLP-маркеров были протестированы регионы, где сравнительное картирование показало вероятность нахождения локусов ортологичных количественных признаков (QTL) толерантности к алюминию у других видов растений (Wright et al., 2006). Для оценки реакции роста корней на воздействие Al разработали хромосомную генетическую карту для рекомбинантной инбредной популяции посевного овса и для идентификации маркеров SNP, связанных с локусами количественных признаков (QTL) (Schneider et al., 2015).

Формирование исходного материала, отбор образцов с проявлением признака алюмотолерантности имеют большое значение в селекции овса посевного (Kosareva et al., 2013). Ранее нами была установлена значительная меж- и внутривидовая изменчивость в роде *Avena* L. по признаку устойчивости к алюмотоксичности и определены регионы, из которых происходили устойчивые образцы (Kosareva et al., 1998; Kosareva, 2012; Loskutov et al., 2017).

Целью настоящего исследования было изучение алюмоустойчивости большого набора образцов овса из мировой коллекции ВИР для использования в селекции на продуктивность и эдафическую устойчивость данной культуры.

Материалы и методы

В изучение были взяты 687 образцов овса из мировой коллекции ВИР, различающихся по эколого-географическому происхождению (Kosareva et al., 2021). Образцы овса проходили полевое изучение на полях научно-производственной базы (НПБ) «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» по основным хозяйственно ценным признакам в 2011 г. и в 2014–2019 гг. Размножение и изучение образцов коллекции проводили по методическим указаниям ВИР (Loskutov et al., 2012).

Лабораторное изучение образцов коллекции проводили в климатической камере с освещенностью 7 Лк, температурой 19–21°C и фотопериодом 16 ч. За основу нами был взят метод оценки алюмоустойчивости А. Aniol (1991, 1996) в нашей модификации (Kosareva et al., 1995; Kosareva, Semenova, 2005) с использованием эриохромцианинового красителя, разработанный для зерновых культур, в основе которого лежит учет степени восстановления (или отсутствия восстановления) митотической активности корней проростков, подвергнутых шоковому воздействию повышенных концентраций алюминия. Устойчивость растений к алюминию определяли по длине отрастания кончика корешка.

Статистическая обработка результатов. Для каждого образца по всем вариантам опыта рассчитывали основные статистические параметры (среднее в см, ошибка среднего, коэффициент вариации CV в %, значения минимума и максимума прироста корня в см). Для статистической обработки данных использовали пакет программ Statistica 13.3. Для сравнения двух испытаний алюмоустойчивости набора образцов использован t-критерий Стьюдента для связанных выборок. Различия групп географического происхождения показаны дисперсионным анализом с апостериорным критерием LSD.

Результаты и обсуждение

В ходе исследований проверяли воспроизводимость метода оценки алюмоустойчивости образцов овса. Для этого одни и те же образцы высевали в течение двух лет (2014–2015 гг.) и тестировали алюмоустойчивость полученных зерен (табл. 1). Критерий Стьюдента (t-критерий) для связанных выборок показал отсутствие различий между повторностями ($p = 0,597$). При этом для 19 сортов из 20 достоверных различий между повторностями нет; только для одного образца (к-12104) устойчивость во второй повторности была ниже, чем в первой (0,6 вместо 0,8; $p = 0,021$). Таким образом, данный показатель характеризуется высокой воспроизводимостью.

Повторяемость опыта дает возможность сравнивать результаты, полученные на зерне разных образцов овса, выращенных в разные годы изучения.

По результатам лабораторного скрининга установлено, что устойчивость образцов, выраженная через отрастание кончика корня, варьировала от 0,1 до 2,1 см. Неустойчивых образцов, с отсутствием репарационного отрастания, не было. Среднее значение устойчивости в выборке – 0,96 см, медианное – 0,94 см; 50% изученных образцов имели устойчивость в интервале 0,64–1,25 см. По величине отрастания корня образцы разделены на группы устойчивости. Слабой устойчивостью (отрастание 0,1–0,75 см) отличались 187 образцов. Из них у 6 образцов отмечено минимальное отрастание (0,1 см): у сортов

Таблица 1. Сравнение результатов оценки алюмоустойчивости образцов овса, выращенных в полевых условиях научно-производственной базы «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР», 2014–2015 гг.

Table 1. Comparison of the aluminum resistance assessment results among oat accessions grown under the field conditions at Pushkin and Pavlovsk Laboratories of VIR in 2014–2015

№ по каталогу ВИР	Отрастание кончика корня, см							
	2014				2015			
	Среднее	Стандартное отклонение	Минимум	Максимум	Среднее	Стандартное отклонение	Минимум	Максимум
10796	1,0	0,3	0,6	1,4	1,2	0,3	0,7	1,5
10870	0,9	0,1	0,8	1,0	0,9	0,3	0,5	1,2
10935	1,4	0,4	1,0	1,8	1,3	0,3	0,8	1,7
11369	0,8	0,0	0,8	0,8	0,9	0,2	0,5	1,5
11718	1,0	0,2	0,8	1,1	0,7	0,3	0,3	1,0
11901	1,0	0,0	1,0	1,0	0,8	0,3	0,5	1,3
11902	1,4	0,1	1,3	1,4	1,1	0,3	0,7	1,5
12104	0,8	0,1	0,7	1,0	0,6	0,2	0,3	0,9
12105	0,6	0,0	0,6	0,6	0,6	0,2	0,3	1,1
12363	0,5	0,0	0,5	0,5	0,5	0,1	0,4	0,6
12370	1,1	0,3	0,5	1,7	1,1	0,2	0,7	1,3
12371	0,8	0,2	0,4	1,2	0,8	0,2	0,5	1,2
12380	1,2	0,4	0,7	1,8	1,2	0,2	0,8	1,5
12381	1,2	0,3	0,8	1,7	1,2	0,2	0,9	1,4
12382	1,2	0,4	0,8	1,7	1,1	0,2	0,8	1,4
12383	0,7	0,2	0,4	1,1	0,6	0,2	0,3	1,1
12385	1,5	0,3	0,9	2,0	1,4	0,3	0,9	1,8
12387	0,6	0,1	0,4	0,8	0,5	0,1	0,3	0,8
12402	1,4	0,3	1,0	1,8	1,4	0,3	0,7	1,7
12436	1,6	0,3	1,0	1,8	1,6	0,1	1,3	1,7
Среднее	1,1	0,4	0,4	2,0	1,0	0,4	0,3	1,8

‘Владыка’ (к-15408, Беларусь), ‘Wombat’ (к-15748, Австралия) и образцов из Бразилии (к-15489, к-15597, к-15610, к-15730). Высокую устойчивость (отрастание больше 1,5 см) показали 88 образцов овса, в том числе максимальную величину отрастания (2,0–2,1 см) имели 5 образцов: из России – ‘Козырь’ (к-14029, Московская обл.), У 70/14 (к-15572, Ульяновская обл.), Австралии – ‘Tungoo’ (к-15750), Бразилии – к-15735, к-15740 (табл. 2). Следует отметить, что наибольшее число устойчивых образцов происходит из Российской Федерации (Московской, Кировской, Ульяновской, Томской областей, Алтайского края) и Бразилии. Основная масса образцов показала среднюю устойчивость к алюмотоксичности (рис. 1).

Рассмотрено проявление признака устойчивости к токсичному действию алюминия у образцов овса различного эколого-географического происхождения (табл. 3).

Наибольшее число изученных образцов было из России – 384, Бразилии – 125, Китая – 29, Германии и США – по 20, Словакии – 17, Швеции – 14 образцов.

Исследовали особенности групп географического происхождения с числом образцов 10 и более. Однофакторный дисперсионный анализ показал наличие выделяющихся по устойчивости групп ($p = 0,000$) (рис. 2).

Апостериорный критерий LSD показал наличие контрастных групп, достоверно отличающихся друг от дру-

Таблица 2. Характеристика алюмоустойчивости выделившихся образцов овса

Table 3. Characterization of aluminum resistance in the selected oat accessions

Номер по каталогу ВИР	Образец	Происхождение	Число измерений, шт.	Отрастание кончика корня, см			
				Среднее	Коэффициент вариации, %	Минимум	Максимум
14029	‘Козырь’	Россия, Московская обл.	39	2,00 ± 0,05	15,8	1,3	2,5
15573	У-70/14	Россия, Ульяновская обл.	41	2,01 ± 0,04	11,9	1,5	2,4
15735	UFRGS 03 8028-6	Бразилия	36	2,11 ± 0,04	11,7	1,7	2,7
15740	UFRGS 04 7000-1	Бразилия	35	2,00 ± 0,04	1,32	1,5	2,5
15750	‘Tungoo’	Австралия	36	2,03 ± 0,04	12,4	1,7	2,5

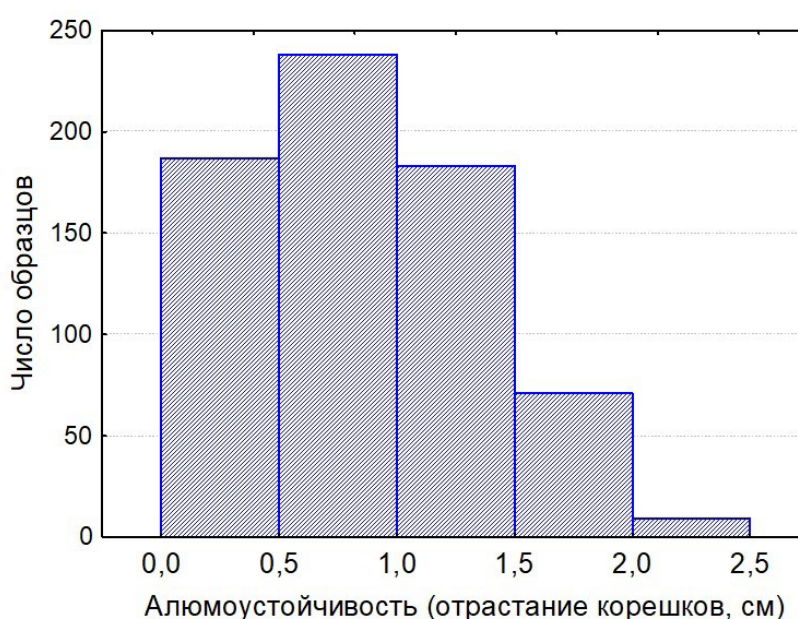


Рис. 1. Распределение 687 образцов овса по алюмоустойчивости

Fig. 1. Distribution of 687 oat accessions according to their aluminum resistance

Таблица 3. Проявление признака устойчивости к алюминию у образцов овса

Table 2. Characterization of aluminum resistance in oat accessions

Происхождение	Число образцов, шт.	Отрастание кончика корня, см				
		Среднее	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации, %	Минимум	Максимум
Австралия	9	0,94 ± 0,19	0,58	61,2	0,14	2,03
Австрия	8	0,79 ± 0,13	0,37	46,7	0,20	1,32
Беларусь	4	1,04 ± 0,11	0,22	21,3	0,90	1,37
Болгария	1	0,81	–	–	0,81	0,81
Бразилия	125	0,7 ± 0,04	0,48	68,8	0,10	2,11
Великобритания	4	0,57 ± 0,15	0,31	53,4	0,37	1,02
Германия	20	1,04 ± 0,06	0,27	25,8	0,53	1,59
Казахстан	7	0,7 ± 0,1	0,27	38,2	0,31	1,08
Канада	7	0,72 ± 0,1	0,26	35,6	0,47	1,13
Кипр	1	0,2	–	–	0,2	0,2
Китай	29	0,57 ± 0,07	0,40	69,6	0,16	1,67
Киргизия	1	1,16	–	–	1,16	1,16
Латвия	2	1,46 ± 0,04	0,05	3,7	1,43	1,50
Нидерланды	2	1,52 ± 0,04	0,06	3,6	1,48	1,56
Норвегия	4	0,97 ± 0,11	0,22	23,2	0,80	1,29
Перу	1	0,65	–	–	0,65	0,65
Польша	11	1,03 ± 0,09	0,31	30,5	0,57	1,58
Португалия	1	1,14	–	–	1,14	1,14
Россия, Адыгея	5	1,07 ± 0,25	0,57	53,2	0,47	1,79
Россия, Алтайский край	19	1,44 ± 0,08	0,34	23,4	0,83	1,89
Россия, Архангельская обл.	1	0,67	–	–	0,67	0,67
Россия, Бурятия	4	0,85 ± 0,13	0,26	31,0	0,58	1,18
Россия, Свердловская обл.	8	0,93 ± 0,08	0,22	23,5	0,66	1,17
Россия, Иркутская обл.	6	1,18 ± 0,18	0,44	37,0	0,82	1,79
Россия, Кемеровская обл.	8	1,11 ± 0,18	0,50	44,6	0,48	1,95
Россия, Кировская обл.	96	1,09 ± 0,03	0,33	30,4	0,30	1,85
Россия, Краснодарский край	6	1,16 ± 0,16	0,38	33,1	0,68	1,63
Россия, Красноярский край	4	1,15 ± 0,3	0,60	52,1	0,31	1,60

Таблица 3. Окончание
Table 2. The end

Происхождение	Число образцов, шт.	Отрастание кончика корня, см				
		Среднее	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации, %	Минимум	Максимум
Россия, Курская обл.	4	0,86 ± 0,14	0,28	33,1	0,70	1,29
Россия, Ленинградская обл.	10	1,1 ± 0,11	0,36	32,7	0,58	1,72
Россия, Московская обл.	82	1,06 ± 0,04	0,38	36,1	0,10	2,00
Россия, Мурманская обл.	1	1,05	–	–	1,05	1,05
Россия, Новосибирская обл.	6	1,31 ± 0,08	0,20	15,4	1,00	1,59
Россия, Омская обл.	33	1,07 ± 0,07	0,38	35,2	0,49	1,77
Россия, Орловская обл.	1	0,94	–	–	0,94	0,94
Россия, Республика Саха	3	0,87 ± 0,28	0,48	55,0	0,43	1,38
Россия, Сахалинская обл.	1	0,63	–	–	0,63	0,63
Россия, Свердловская обл.	6	1,6 ± 0,13	0,32	20,0	1,10	1,95
Россия, Томская обл.	18	1,25 ± 0,09	0,37	29,6	0,59	1,85
Россия, Тюменская обл.	13	1,27 ± 0,08	0,27	21,4	0,87	1,84
Россия, Ульяновская обл.	45	0,9 ± 0,06	0,43	48,0	0,12	2,01
Россия, Хабаровский край	4	1,14 ± 0,1	0,19	17,0	0,87	1,30
Словакия	17	0,71 ± 0,07	0,31	43,3	0,25	1,43
США	20	1,04 ± 0,09	0,41	39,0	0,52	1,98
Турция	1	1,76	–	–	1,76	1,76
Украина	1	0,84	–	–	0,84	0,84
Финляндия	3	1,13 ± 0,14	0,24	21,6	0,88	1,36
Франция	2	0,92 ± 0,38	0,54	58,9	0,54	1,31
Чехия	4	1,09 ± 0,21	0,41	38,0	0,47	1,35
Швейцария	1	0,84	–	–	0,84	0,84
Швеция	14	1,01 ± 0,07	0,28	27,5	0,55	1,46
Эквадор	1	0,53	–	–	0,53	0,53
Эстония	1	0,73	–	–	0,73	0,73
Япония	1	0,77	–	–	0,77	0,77
Всего	687	0,96 ± 0,02	0,44	45,1	0,10	2,11

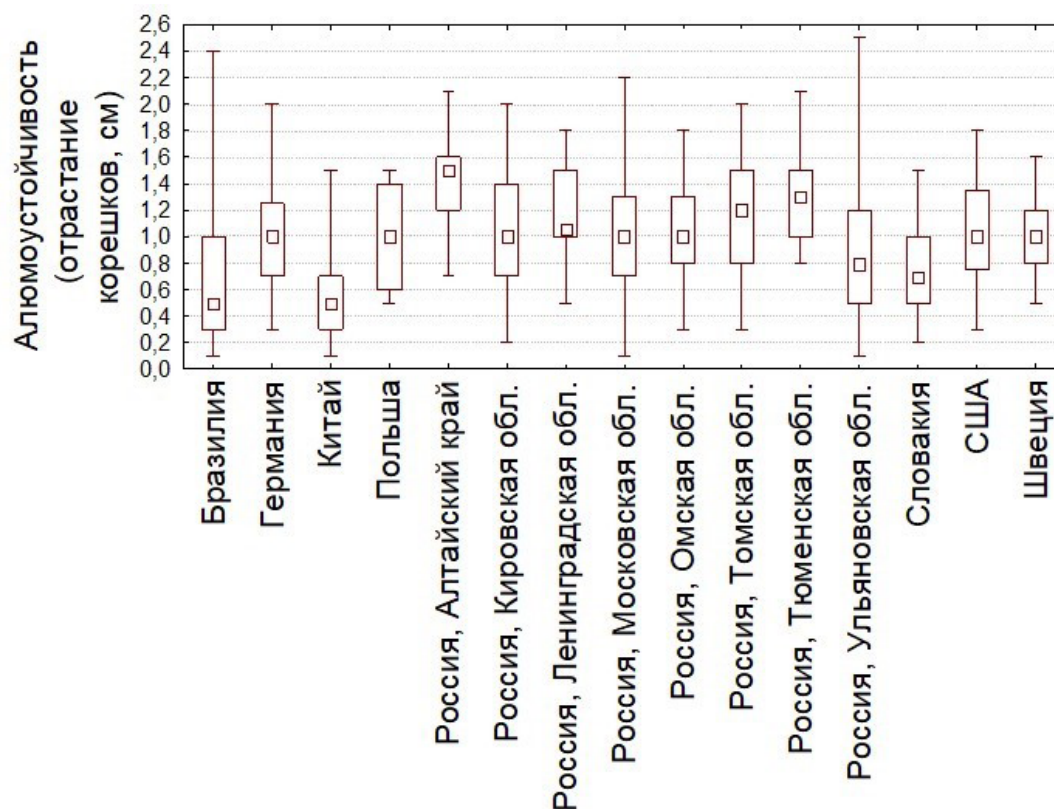


Рис. 2. Характеристика групп овса различного географического происхождения, представленных более чем 10 образцами (показаны медиана, квартили, минимальное, максимальное значения)

Fig. 2. Characteristics of the oat groups of different geographic origin represented by more than 10 accessions (showing medians, quartiles, minimum and maximum values)

га – с наименьшей устойчивостью (приростом корешков после шокового воздействия алюминия): Китай (0,57 см), Бразилия (0,70 см), Словакия (0,74 см) и наибольшей – Россия, Ленинградская обл. (1,12 см), Томская обл. (1,21 см), Тюменская обл. (1,34 см), Алтайский край (1,42 см).

Все выделенные образцы могут быть рекомендованы в качестве источников для селекции овса на алюмоустойчивость в регионах с кислыми почвами.

Заключение

Метод оценки алюмоустойчивости А. Aniol (1996) в модификации И. А. Косаревой и Е. В. Семеновой (Kosareva, Semenova, 2005) с использованием эриохромцианинового красителя имеет хорошую повторяемость, что позволяет проводить однократную оценку. В результате изучения 687 образцов овса выделены слабо-, средне- и высокоустойчивые к токсичному действию ионов Al^{3+} образцы. Большинство образцов имели среднюю устойчивость (отрастание корня от 0,76 до 1,5 см). Установлено, что наибольшей устойчивостью (приростом корешков после шокового воздействия алюминия) обладали образцы из России, а именно из Ленинградской (1,12 см), Томской (1,21 см), Тюменской (1,34 см) областей и Алтайского края (1,42 см). Выделено 5 источников алюмотолерантности для использования в селекции овса в регионах с кислыми почвами: образцы из России – ‘Козырь’ (к-14029, Московская обл.), У 70/14 (к-15572, Ульяновская обл.), из Австралии – ‘Tungoo’ (к-15750), Бразилии – к-15735, к-15740.

References / Литература

- Aniol A. Aluminium uptake by roots of rye seedlings of differing tolerance to aluminium toxicity. *Euphytica*. 1996;92:155-162. DOI: 10/1007/BF00022841
- Aniol A. Metody określania tolerancji zboż na toksyczne działanie jonów glinu. *Bulletin of Plant Breeding and Acclimatization Institute*. 1991;(143):7-11. [in Polish]
- Aniol A. The aluminum tolerance in wheat. In: V. Ruzgas, E. Lemežis, M. Apanavičienė, A. Basiulis, J. Bilis (eds). *Plant Breeding: Theories, Achievements and Problems. Proceedings of the international conference; Kėdainiai, Lithuania; 14–16 July 1997*. Kėdainiai: Dotnuva-Akademija; 1997. p.14-22.
- Aniol A., Gustafson J.P. Chromosome location of genes controlling aluminum tolerance in wheat, rye and triticale. *Canadian Journal of Genetics and Cytology*. 1984;26(6):701-705. DOI: 10.1139/g84-111
- Avdonin N.S. Scientific fundamentals of fertilizer application (Nauchnye osnovy primeneniya udobreniy). Moscow; 1972. [in Russian] (Авдонин Н.С. Научные основы применения удобрений. Москва; 1972).
- Gupta N., Gaurav S.S., Kumar A. Molecular basis of aluminium toxicity in plants: a review. *American Journal of Plant Sciences*. 2013;4(12):21-37. DOI: 10.4236/ajps.2013.412A3004
- Kosareva I.A. The study of crops and wild relatives collections for signs of resistance to toxic elements of acid soils. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2012;170:34-44. [in Russian] (Косарева И.А. Изучение коллекций сельскохозяйственных культур и диких родичей по признакам устойчивости к токсическим

- элементам кислых почв. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2012;170:34-44).
- Kosareva I.A., Blinova E.V., Loskutov I.G. Catalogue of the VIR global collection. Issue 934. Oats: Description of accessions according to their resistance to aluminum. St. Petersburg: VIR; 2021. [in Russian] (Косарева И.А., Блинова Е.В., Лоскутов И.Г. Каталог мировой коллекции ВИР. Выпуск 934. Овес: Характеристика образцов по устойчивости к алюмотоксичности кислых почв. Санкт-Петербург: ВИР; 2021). DOI: 10.30901/978-5-907145-77-1
- Kosareva I.A., Davydova G.V., Semenova E.V. Diagnostics of the resistance of oat plants to increased content of aluminum ions in the soil solution (Diagnostika ustoychivosti rasteniy ovsa posevnogo k povyshennomu sodержaniyu ionov alyuminiya v pochvennom rastvore). *Agricultural Biology*. 1998;33(5):73-76. [in Russian] (Косарева И.А., Давыдова Г.В., Семенова Е.В. Диагностика устойчивости растений овса посевного к повышенному содержанию ионов алюминия в почвенном растворе. *Сельскохозяйственная биология*. 1998;33(5):73-76).
- Kosareva I.A., Davydova G.V., Semenova E.R. Guidelines for acid resistance assessment in cereal crops (Metodicheskiye ukazaniya po opredeleniyu kislotoustoychivosti zernovykh kultur). St. Petersburg: VIR; 1995. [in Russian] (Методические указания по определению кислотоустойчивости зерновых культур. Санкт-Петербург: ВИР; 1995).
- Kosareva I.A., Loskutov I.G., Melnikova S.V. Aluminium tolerance in Russian breeding oat varieties. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2013;171:114-116. [in Russian] (Косарева И.А., Лоскутов И.Г., Мельникова С.В. Алюмоустойчивость сортов овса отечественной селекции. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2013;171:114-116).
- Kosareva I.A., Semenova Ye.V. Laboratory screening in wheat species on alumotolerance. *Russian Agricultural Sciences*. 2005;(5):5-7. [in Russian] (Косарева И.А., Семенова Е.В. Лабораторный скрининг коллекции пшеницы на алюмотолерантность. *Доклады Российской Академии сельскохозяйственных наук*. 2005;(5):5-7).
- Loskutov I.G., Kosareva I.A., Melnikova S.V., Blinova E.V., Bagmet L.V. Genetic diversity in tolerance of wild *Avena* species to aluminium (Al). *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2017;64(5):955-965. DOI: 10.1007/s10722-016-0417-9
- Loskutov I.G., Kovaleva O.N., Blinova E.V. Guidelines for the study and preservation of the world collection of barley and oats (Metodicheskiye ukazaniya po izucheniyu i sokhraneniyu mirovoy kollektsii yachmenya i ovsa). St. Petersburg: VIR; 2012. [in Russian] (Лоскутов И.Г., Ковалева О.Н., Блинова Е.В. Методические указания по изучению и сохранению мировой коллекции ячменя и овса. Санкт-Петербург: ВИР; 2012).
- Nava I.C., Delatorre C.A., de Lima Duarte I.T., Pacheco M.T., Federizzi L.C. Inheritance of aluminum tolerance and its effects on grain yield and grain quality in oats (*Avena sativa* L.). *Euphytica*. 2006;148(3):353-358. DOI: 10.1007/s10681-005-9048-5
- Nettevich E.D. Spring wheat in the Non-Black-Earth Zone (Yarovaya pshenitsa v Nechernozemnoy zone). Moscow: Rosselkhozizdat; 1976. [in Russian] (Неттевич Э.Д. Яровая пшеница в Нечерноземной зоне. Москва: Россельхозиздат; 1976).
- Rodionova N.A., Soldatov V.N., Merezhko V.E., Yarosh N.P., Kobylansky V.D. Flora of cultivated plants. Vol. 2 (Pt 3). Oat (Kulturnaya flora. T. 2, ch. 3. Oves). Moscow: Kolos; 1994. [in Russian] (Родионова Н.А., Солдатов В.Н., Мережко В.Е., Ярош Н.П., Кобылянский В.Д. Культурная флора СССР. Т. 2, ч. 3. Овес. Москва: Колос; 1994).
- Schneider A.B., Nava I.C., Hervé C.B., Islamovic E., Limberger E., Jackson E.W. et al. Chromosome-anchored QTL conferring aluminum tolerance in hexaploid oat. *Molecular Breeding*. 2015;35(5):121. DOI: 10.1007/s11032-015-0315-4
- Silva S. Aluminium toxicity targets in plants. *Journal of Botany*. 2012;2012(11):219462. DOI: 10.1155/2012/219462
- Wright C.P., Kibite S., Tinker N.A., Molnar S.J. Identification of molecular markers for aluminium tolerance in diploid oat through comparative mapping and QTL analysis. *Theoretical and Applied Genetics*. 2006;112(2):222-231. DOI: 10.1007/s00122-005-0114-0
- Zhao X.Q., Shen R.F. Aluminum-nitrogen interactions in the soil-plant system. *Frontiers in Plant Science*. 2018;9:807. DOI: 10.3389/fpls.2018.00807

Информация об авторах

Игорь Градиславович Лоскутов, доктор биологических наук, доцент, главный научный сотрудник, заведующий отделом, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, 199034 Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9, i.loskutov@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9250-7225>

Елена Владимировна Блинова, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, e.blinova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8898-4926>

Любовь Юрьевна Новикова, доктор сельскохозяйственных наук, заведующая отделом, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, l.novikova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4051-3671>

Information about the authors

Igor G. Loskutov, Dr. Sci. (Biology), Associate Professor, Chief Researcher, Head of a Department, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, Professor, St. Petersburg State University, 7-9 Universitetskaya Emb., St. Petersburg 199034, Russia, i.loskutov@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9250-7225>

Elena V. Blinova, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, e.blinova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8898-4926>

Liubov Yu. Novikova, Dr. Sci. (Agriculture), Head of a Department, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, l.novikova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4051-3671>

Вклад авторов: все результаты по алюмоустойчивости образцов овса были получены в лаборатории физиологии растений ВИР под руководством кандидата сельскохозяйственных наук Ирины Александровны Косаревой. Лоскутов И. Г., Блинова Е. В. и Новикова Л.Ю. проанализировали полученные результаты исследований, обобщили и написали текст данной статьи.

Contribution of the authors: all results on the aluminum tolerance of oat accessions were obtained at the Plant Physiology Laboratory of VIR under the supervision of its head Irina A. Kosareva, Cand. Sci. (Agriculture). Loskutov I. G., Blinova E. V. and Novikova L. Yu. analyzed the research results, summarized them and wrote the text of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 04.10.2023; одобрена после рецензирования 27.12.2023; принята к публикации 04.03.2024.
The article was submitted on 04.10.2023; approved after reviewing on 27.12.2023; accepted for publication on 04.03.2024.