

Вестник Курганской ГСХА. 2023. № 2 (46). С. 25–33

Vestnik Kurganskoy GSNA. 2023; (2–46): 25–33

Научная статья

УДК 633.13:524.16

Код ВАК 4.1.1

EDN: JNYNXZ

К ВОПРОСУ О СОРТОВОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОВСА К ТОКСИЧЕСКОМУ ДЕЙСТВИЮ АЛЮМИНИЯ НА РАННИХ ЭТАПАХ ОНТОГЕНЕЗА

Дмитрий Иванович Ерёмин^{1✉}, Юлия Владимировна Савельева²

^{1,2} Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северного Зауралья – филиал Федерального исследовательского центра Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук, Тюмень, Россия

¹ soil-tyumen@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-3672-6060>

² saveleva.yv@edu.gausz.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9627-6498>

Аннотация. Цель исследования – выявление сортов овса, устойчивых к токсическому действию ионов алюминия, для выращивания на кислых почвах Западной Сибири. Объектом изучения были сорта овса Тюменской селекции: Тоболяк, Отрада, Талисман, Мегион и Фома. Для определения генотипов, наиболее устойчивых к ионам алюминия, была использована методика, основанная на изучении изменения лабораторной всхожести овса при увлажнении раствором сульфата алюминия с концентрацией 1 г/литр относительно контроля (дистиллированная вода). Через семь суток рассчитывали лабораторную всхожесть: воздушно-сухую массу проростка и первичных корешков. В ходе проведения лабораторных исследований было установлено, что ионы алюминия обладают незначительным стимулирующим эффектом для прорастания сортов Тоболяк и Фома. Лабораторная всхожесть этих сортов составила 97 и 96 %, тогда как на контроле 85 и 89 % соответственно. Сорт Талисман характеризовался угнетением ионами алюминия – всхожесть снижалась с 99 до 92 % при наименьшей существенной разнице, равной 5 %. Биомасса ростков сорта Мегион под действием ионов алюминия уменьшилась на 30 %, что указывает на отсутствие у этих сортов устойчивости к ионам алюминия. Сорта Отрада, Талисман и Фома обладают устойчивостью к почвенной кислотности, вызываемой ионами алюминия – разница между контролем и вариантом была ниже наименьшей существенной разницы. Используемая методика оценки алюмоустойчивости овса на ранних этапах онтогенеза характеризуется высокой степенью объективности для выявления генетической устойчивости сортов для выращивания на кислых почвах. Также она перспективна для использования при оценке исходного материала для селекции алюмоустойчивых сортов в Западной Сибири. В ходе исследований выявлены сорта, обладающие устойчивостью к токсическому действию алюминия на ранних этапах онтогенеза. Рекомендованы для агропромышленного комплекса и дальнейшей селекционной работы сорта Отрада, Фома и Тоболяк.

Ключевые слова: катионы алюминия, овёс (*Avena sativa*, L.), алюмоустойчивость, алюмотолерантность, кислотность почвы, окислительный стресс, угнетение овса, лабораторная всхожесть.

Благодарности: работа выполнена по госзаданию №122011300103-0 и при поддержке Западно-Сибирского межрегионального научно-образовательного центра мирового уровня.

Для цитирования: Ерёмин Д.И., Савельева Ю.В. К вопросу о сортовой устойчивости овса к токсическому действию алюминия на ранних этапах онтогенеза // Вестник Курганской ГСХА. 2023. № 2 (46). С. 25–33. EDN: JNYNXZ.

Scientific article

QUESTION OF VARIETY RESISTANCE OF OATS TO TOXIC EFFECT OF ALUMINUM IN EARLY STAGES OF ONTOGENESIS

Dmitry I. Eremin^{1✉}, Yulia V. Savelyeva²

^{1,2} The Research Institute of Agriculture of the Northern Trans-Urals is a branch of the Federal Research Center of the Tyumen Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russia

¹ soil-tyumen@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-3672-6060>

² saveleva.yv@edu.gausz.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9627-6498>

Abstract. The purpose of the study is to identify oat varieties resistant to the toxic effect of aluminum ions for cultivation on acid soils of Western Siberia. The object of the study was oat varieties of Tyumen breeding: Tobolyak, Otrada, Talisman, Megion and Foma. To determine the genotypes most resistant to aluminum ions, a method was used which studied changes in the laboratory germination of oats when moistened with a solution of aluminum sulfate in the concentration of 1 g/liter compared to the control (distilled water). In 7 days, laboratory germination of the air-dry mass of the seedling and radicles was calculated. In the course of laboratory studies, it was found that aluminum ions have a slight stimulating effect on the germination of Tobolyak and Foma varieties. The laboratory germination of these varieties was 97 and 96 %, while in the control it was 85 and 89 % respectively. Variety Talisman was characterized by inhibition by aluminum ions. The germination decreased from 99 to 92 % with the smallest significant difference equal to 5 %. The biomass of Megion variety seedlings decreased by 30% under the action

of aluminum ions which indicates the absence of resistance to aluminum ions in these varieties. Varieties Otrada, Talisman and Foma are resistant to soil acidity caused by aluminum ions. The difference between the control and the variant was below the smallest significant difference. The method used for assessing the aluminum resistance of oats in the early stages of ontogenesis is characterized by a high degree of objectivity. It identifies the genetic resistance of varieties for growing on acid soils. It is also promising for assessing the source material for breeding aluminum-resistant varieties in Western Siberia. In the course of the research, varieties were identified that are resistant to the toxic effect of aluminum in the early stages of ontogenesis. Varieties Otrada, Foma and Tobolyak are recommended for the agro-industrial complex and further breeding work.

Keywords: aluminum cations, oats (*Avena sativa*, L.), aluminum resistance, aluminum tolerance, soil acidity, oxidative stress, inhibition of oats, laboratory germination.

Acknowledgments: the study was carried out as part of the state task №122011300103-0 and with the support of the West Siberian inter-regional scientific and educational center of the world level.

For citation: Eremin D. i., Savelyeva Yu. V. Question of variety resistance of oats to toxic effect of aluminum in early stages of ontogenesis // Vestnik Kurganskoy GSHA. 2023; (2–46): 25–33. EDN: JNYNXZ. (in Russ).

Введение. Алюминий – третий по распространенности элемент в земной коре после кислорода и кремния. В почве он встречается как структурная составляющая первичных и вторичных минералов. В ходе почвообразовательного процесса ионы алюминия высвобождаются и поглощаются почвенными коллоидами. С этого момента алюминий становится биологически активным химическим элементом и участвует в формировании основных свойств почвы [1].

Еще К. К. Гедройц в 1930 году отмечал роль алюминия в формировании почвенной кислотности, которая негативно влияет на рост и развитие сельскохозяйственных культур. Современные исследования показали, что причиной снижения урожайности выступает не столько кислотность, обусловленная ионами алюминия, сколько его токсический эффект [2]. В почвах ионы алюминия обуславливают ее потенциальную кислотность. Находясь в почвенно-поглощительном комплексе, алюминий может замещаться другими катионами, тем самым становясь доступным для растений. Именно в таких случаях кислотность почвы оказывает негативное влияние на рост и развитие растений. Наличие ионов алюминия в почвенном растворе мешает поглощать такие питательные вещества, как фосфор и микроэлементы. Содержание обменного алюминия закономерно уменьшается от подзолистых почв до черноземов. В Западной Сибири основная часть пашни расположена на выщелоченных и оподзоленных черноземах, а также на серых лесных почвах. Как отмечают исследователи, в них всегда присутствуют ионы алюминия, которые постоянно пополняют почвенно-поглощающий комплекс при естественном почвообразовании [3]. Поэтому необходимо признать, что для гумидной зоны, куда входит Западная Сибирь, для современного сельского хозяйства требуется создание сортов зерновых культур, с закрепленной на генетическом уровне алюмотолерантностью. Для южных регионов (степная зона) почвы имеют иные физико-химические свойства, поэтому для них вопрос алюмоустойчивых сортов не актуален [4–5].

Механизм воздействия алюминия на растительные клетки достаточно сложный. В целом его можно представить как химическую реакцию с органическими кислотами и полифенолами, имею-

щимися в корнях растений, с последующим образованием хелатных соединений. Если в растениях достаточно органических кислот, то алюминий не успевает вступать в реакцию с ферментами, в состав которых входят полифенолы, и негативный эффект не проявляется – растения принято считать алюмоустойчивыми [6].

По исследованиям Н. С. Авдониной, при содержании в почве 3–5 мг/100 г подвижного алюминия наблюдается его токсическое действие на корневую систему на ранних этапах онтогенеза. Это негативно сказывается на потреблении растениями элементов питания из почвы [7]. Потери урожайности, связанные с алюмотоксичностью, варьируются от 10 до 40 % в зависимости от насыщения почвы алюминием, вида сельскохозяйственных культур. В последние годы активно ведутся работы по изучению сортовой алюмотолерантности и устойчивости к ионам алюминия [8].

Наиболее распространённое визуальное проявление алюминиевой токсичности – кораллоподобная морфология корня, вызванная подавлением боковых и утолщением первичных корней. Тормозится рост корневой системы, корни приобретают темную окраску, снижается их длина и масса, уменьшается ветвление и количество корневых волосков. Также снижается интенсивность фотосинтеза и содержание хлорофилла, происходит разрушение хлоропластов, вследствие чего возникают хлоротические пятна, некрозы [9–10].

Растения способны нейтрализовать ионы алюминия не только в корнях, но и листьях, что крайне важно для предотвращения нарушения биохимических реакций. Перемещение алюминия из корней в надземную часть указывает на то, что имеющегося количества органических кислот в растении недостаточно для его связывания. Поэтому ионы алюминия будут передвигаться в растениях до тех пор, пока не произойдет химическая реакция с образованием хелатных солей. Однако, как показали современные исследования, не все органические кислоты делают алюминий инертным в биохимическом понимании. Например, при взаимодействии алюминия с яблочной и лимонной кислотами образовавшиеся соли не теряют своей подвижности и способны передвигаться по растению. При встрече таких солей с ферментами про-

исходит реакция, при которой алюминий связывается с ними. Тем самым нарушается естественный биохимический цикл на клеточном уровне. При взаимодействии ионов алюминия с щавелевой кислотой образуются устойчивые соли – оксалаты, химическая активность которых минимальна. Алюминий, который проник из корней в зеленые части растения в виде оксалата, уже не реагирует с полифенолами, тем самым не снижает ферментативную активность [10-12]. Установлено, что чем быстрее растения синтезируют щавелевую кислоту, тем выше у них алюмоустойчивость. Наиболее сильно выделяются в этом отношении гречиха, овёс, озимая рожь [9; 13].

R. Shetty с коллегами установили, что алюминий химически реактивен, существует множество потенциальных участков, включая клеточную стенку, поверхность плазматической мембраны, цитоскелет и ядро, которые могут стать мишенями для повреждения. Алюминий нарушает динамику цитоскелета, взаимодействует как с микротрубочками, так и с актиновыми филаментами [14].

Устойчивость растений к токсичности алюминия имеет сложную природу и ее можно контролировать на генетическом уровне. В ходе многочисленных испытаний в России и за рубежом выявлены сортовые особенности алюмоустойчивости зерновых культур, в том числе овса [15]. Это дает определенную перспективу создания сортов, способных эффективно произрастать на кислых почвах, площадь которых в Российской Федерации достигает 40 % от посевных площадей.

Повышенные концентрации алюминия переносят без вреда лишь некоторые роды растений. К ним относятся люпин (*Lupinus* L.), картофель (*Solanum tuberosum* L.), кукуруза (*Zea* L.). Такие роды растений, как клевер (*Trifolium* L.) и люцерна (*Medicago* L.), не выносят и минимальных концентраций ионов алюминия в почвенном растворе.

Среди зерновых культур, устойчивых к токсичному действию алюминия, наибольшей устойчивостью характеризуются овес (*Avena sativa* L.) и озимая рожь (*Secale cereale* L.). Менее стойкими являются кукуруза (*Zea* L.) и яровая мягкая пшеница (*Triticum aestivum* L.). Не выносят даже минимальных концентраций ионов алюминия ячмень (*Hordeum* L.), озимая пшеница [8].

Овес является одной из основных сельскохозяйственных культур в Западной Сибири, поскольку ее значительные площади занимают кислые почвы: подзолистые, дерново-подзолистые и серые лесные почвы, характеризующиеся кислой реакцией во всем почвенном профиле [16]. Урожайность на этих почвах низкая, и часто ее нельзя увеличить по причине негативного влияния ионов алюминия, которые угнетают сельскохозяйственные культу-

ры на протяжении всего вегетационного периода. Также к кислым почвам относятся торфяно-болотные, но в данном типе почв кислотность обусловлена ионами водорода. Сельскохозяйственные культуры лучше переносят высокую кислотность на торфяно-болотных почвах, чем на подзолистых, дерново-подзолистых и серых лесных, даже если она одинаковая по обменной кислотности.

Цель исследований – выявление сортов овса, устойчивых к токсическому действию ионов алюминия, для выращивания на кислых почвах Западной Сибири.

Достижение поставленной цели предусматривало решение следующих задач:

- изучить влияние ионов алюминия на лабораторную всхожесть сортов овса;
- установить степень негативного влияния алюминия по морфометрическим показателям проростков овса;
- дать оценку алюмоустойчивости сортов овса по степени изменения длины и массы ростков.

Материалы и методы. Исследование проводили на базе лаборатории геномных исследований в растениеводстве Тюменского научного центра СО РАН в 2022 г. Материалом для исследования алюмоустойчивости послужили сорта овса посевого селекции НИИСХ Северного Зауралья – филиала ТюмНЦ СО РАН (таблица 1).

Таблица 1 – Используемые в опыте сорта овса посевого

Сорт	Разновидность	Происхождение
Тобояк [17]	mutica	Таежник × Орион
Отрада [18-19]	mutica	(WW 170079 × Pc 39) × (Мутика 600 × Risto)
Талисман [20]	mutica	Flamingsnova × Метис
Мегион [21]	mutica	Нарымский 943 × Пшебуй II
Фома [21]	mutica	(WW 170079 × Pc 39) × (Мутика 600 × Risto)

Опыт закладывали по следующей схеме. Тестирующим раствором в опыте был сульфат алюминия с концентрацией 1 г/литр, что соответствовало содержанию подвижного алюминия 10 мг-экв/100 г почвы. Такое количество ионов алюминия характерно для светло-серых, собственно серых лесных почв. Чуть меньшее содержание (5-7 мг-экв/100 г почвы) отмечается в оподзоленных и сильно выщелоченных черноземах Зауралья. В качестве контроля использовали дистиллированную воду. Опыт был заложен в трехкратном повторении по методике Е. М. Лисицына [22].

Проращивание зерен проводилось в лабораторных условиях при температуре 18-20 °С, семена помещали на увлажненную фильтровальную бумагу в чашки Петри на 72 часа. После отбраковывали недоразвитые и непроросшие зерновки, нормальные проростки помещали в чашку на фильтровальную бумагу, закладывали по 50 семян с визуальными признаками прорастания. В опытные чашки добавляли тестирующий раствор сульфата алюминия. На седьмые сутки определяли суммарную длину корней и проростков. После этого их отдельно высушивали в термостате при температуре 85 °С в течение 12 часов. Аллюмоустойчивость оценивалась по соотношению длины корней к длине проростков овса. Результаты исследований подвергались дисперсионному анализу по Б. А. Доспехову с использованием программного продукта Microsoft Excel.

Результаты исследований и их обсуждение. Лабораторные исследования показали, что овес Тюменской селекции по-разному отзывался на катионы алюминия, находящиеся в растворе (рисунок 1). Установлено, что при концентрации 1 г/литр $Al_2(SO_4)_3$ сорта Тобояк и Фома положительно реагируют на ионы алюминия. Лабораторная всхожесть достигала 96-97 %, тогда как на контроле – 85-89 %, при наименьшей существенной разнице 3 %. Аналогичный эффект и механизм физиологического стимулирования растительных клеток был детально описан в работе Н. В. Амосовой, О. Н. Николаевой и Б. И. Сынзыныс [23]. Данный факт обусловлен тем, что на стадии про-

растания овса сульфаты усиливают поглощение ионов алюминия, тем самым запуская механизм их нейтрализации на начальных этапах онтогенеза. К аналогичному выводу также пришли Г. А. Баталова с коллегами [24].

Незначительную разницу в сравнении с контролем показал сорт Отрада. Лабораторная всхожесть варьировалась в пределах 95-97 %. Это указывает на то, что данный генотип не реагирует на катионы алюминия при концентрации 1 г/литр. Разница между контролем и вариантом была недостоверной – наименьшая существенная разница составила 5 %.

Снижение всхожести было зафиксировано у сорта Мегион, всхожесть которого под действием ионов алюминия уменьшилась до 93 %, тогда как на контроле она составила 97 %.

Из пяти исследуемых сортов Талисман оказался самым чувствительным к токсичности катионов алюминия. Всхожесть в растворе сульфата алюминия при исследуемой концентрации составляла 92 %, это ниже на 7 % от контроля ($HCP_{05} = 5\%$).

Общая биомасса сорта Тобояк на контроле была равна $0,52 \pm 0,03$ г, из которых 69 % приходилось на проростки ($0,36 \pm 0,04$ г) и оставшиеся $0,16 \pm 0,02$ г на корешки. На варианте с применением тестирующего раствора сульфата алюминия было выявлено негативное влияние ионов алюминия. Общая биомасса составила $0,37 \pm 0,04$ г, из которых 62 % приходилось на массу проростка. Таким образом, несмотря на то, что всхожесть сорта Тобо-

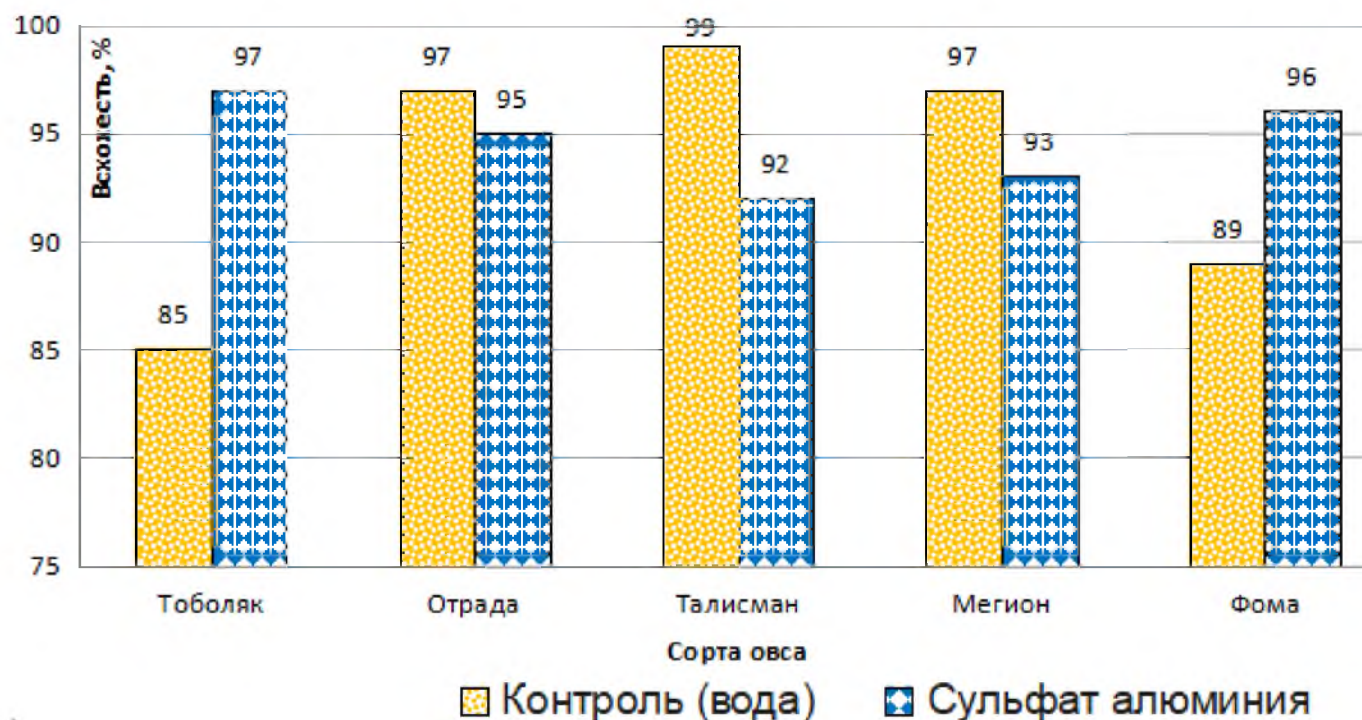


Рисунок 1 – Влияние ионов алюминия на лабораторную всхожесть овса Тюменской селекции, %, ($HCP_{05}=5,0$)

ляк увеличилась под действием ионов алюминия, биомасса проростков на ранних этапах онтогенеза достоверно меньше контроля ($t_{\text{факт}} > t_{\text{теор}}$), что указывает на негативное влияние ионов алюминия на ростовые процессы на начальном этапе онтогенеза.

Сорт Мегион также оказался неустойчивым к катионам алюминия. Общая биомасса на контроле составляла $0,47 \pm 0,04$ г, из которых 64 % приходилось на проростки и 36 % – массу корней. В растворе сульфата алюминия при концентрации 1 г/литр общая биомасса снизилась на 30 % относительно контроля. На массу проростка приходилось $0,16 \pm 0,02$ г, на корень – $0,17 \pm 0,03$ г.

Толерантность в отношении ионов алюминия показал сорт Отрада. На контроле его биомасса составила $0,45 \pm 0,04$ г, из которой $0,27 \pm 0,02$ г приходилось на долю проростка. На варианте с сульфатом алюминия общая биомасса снизилась всего на 0,02 г относительно контроля и составляла $0,43 \pm 0,04$ г, из них 58 % – это масса проростка и 42 % – корня. Отсутствие реакции на ионы алюминия было также выявлено у сорта Талисман. Его биомасса на контроле составила $0,46 \pm 0,04$ г, из которой $0,27 \pm 0,02$ г приходилось на проросток и $0,19 \pm 0,01$ г – на корешки. Разница в биомассе овса между контролем и вариантом с сульфатом алюминия была в пределах ошибки опыта.

Аналогичной была реакция сорта Фома, разница которого в общей биомассе между контролем и тестирующим раствором составляла 4 %. Однако более детальный анализ показал, что на контроле масса проростка была равна $0,29 \pm 0,03$ г, а на варианте с сульфатом алюминия $0,33 \pm 0,03$ г. Так же и по биомассе корня выявлено различие,

в контроле $0,25 \pm 0,02$ г, в опытном образце – $0,19 \pm 0,03$ г. Данный факт указывает на то, что у сорта Фома формирование адаптационных физиологических реакций происходит значительно быстрее, чем у Тоболяка, Мегиона и Отрады, что позволяет включить компенсационный механизм устойчивости к ионам алюминия и справиться с его токсическим действием. Аналогично проявил себя сорт Талисман, лабораторная всхожесть которого под действием сульфата алюминия уменьшилась, но биомасса ростков не отличалась от контроля (рисунок 2).

Помимо снижения массы первичных корешков и проростка крайне важно знать их длину. От этих показателей зависит скорость начала поглощения питательных веществ из почвы и формирование фотосинтезирующего аппарата. Длина корешков и проростка тесно коррелирует со временем перехода с зародышевого питания на автотрофный тип [24].

Средняя длина корней по изучаемым сортам на контроле составила 8,3 см с варьированием от $6,7 \pm 1,2$ (Отрада) до $9,4 \pm 0,4$ см (Талисман). Фома и Тоболяк также обладали корневой системой на уровне максимума. При увлажнении зерна раствором сульфата алюминия средняя длина корней изучаемых сортов составила 5,6 см. Минимальная длина корней отмечена у сортов Тоболяк и Талисман – 4,8 и 5,2 см соответственно. Сорт Фома выделялся максимальной длиной первичных корешков (6,5 см). Ранжирование сортов по степени уменьшения длины первичных корешков под действием ионов алюминия выстроило сорта следующим образом: Отрада < Мегион < Фома < Талисман < Тоболяк (таблица 2).

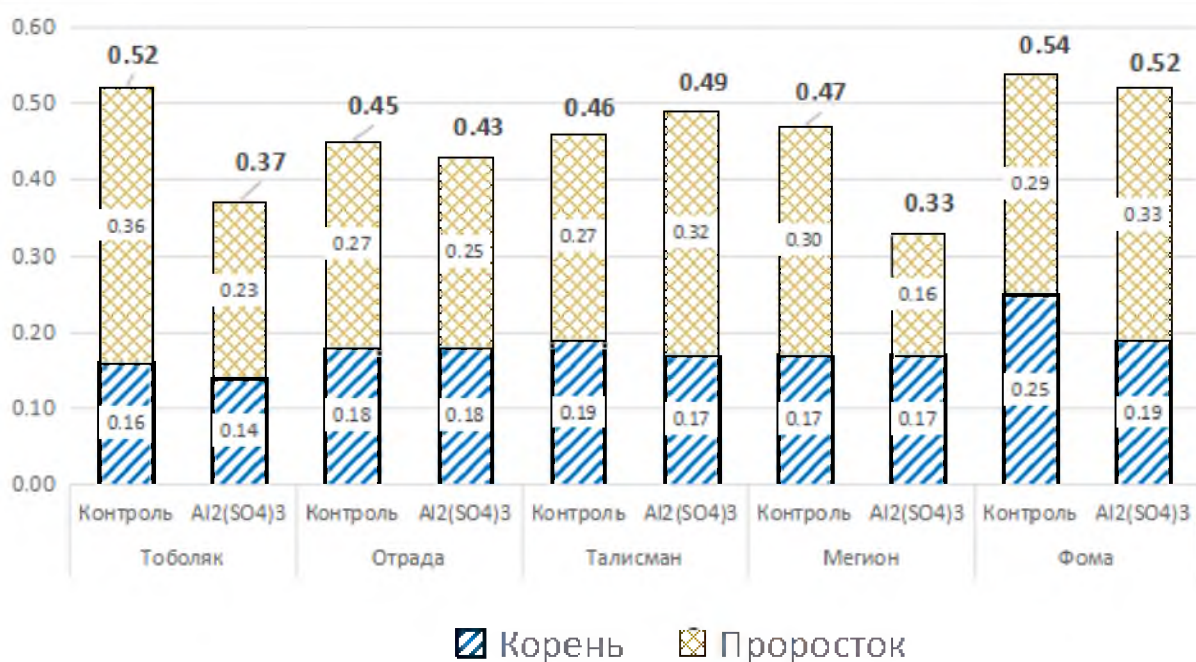


Рисунок 2 – Влияние ионов алюминия на биомассу ростков посевного, г воздушно-сухой массы. НСР₀₅ для: корней – 0,02; проростка – 0,04; общая биомасса проростка – 0,04 г

Длина проростков при отсутствии алюминия варьировалась от 4,4 (Отрада) до 9,4 см (Фома) при среднем значении по сортам 6,5 см. Среднее отношение длины проростка к корням составило 0,78 ед., при широком диапазоне – от 0,70 (Талисман) до 1,00 (Фома). В присутствии ионов алюминия средняя длина проростков по сортам уменьшилась до 5,8 см, или на 11 % относительно контроля. Однако такое незначительное снижение обусловлено тем, что два сорта (Отрада и Талисман) положительно отреагировали на ионы алюминия в растворе. Длина их проростков увеличилась относительно контроля на 15 и 24 %, при этом у Талисмана масса проростков возросла на 33 %. Это указывает на явный стимулирующий эффект ионов алюминия для этого сорта (рисунок 3).

Таблица 2 – Степень изменения длины и массы проростков овса при воздействии ионов алюминия, % от контроля

Сорт	Длина		Масса	
	Корни	Проростки	Корни	Проростки
Тобояк	-44	-22	-10	-5*
Отрада	-12	+15	-2*	-6*
Талисман	-41	+24	-25	+33
Мегион	-29	-27	-18	-57
Фома	-30	-32	-35	0

* – изменения статистически недостоверны ($F_{\text{факт.}} < F_{\text{теор.}}$) при $p = 0,05$

Максимальная степень снижения длины проростков под действием ионов алюминия была отмечена у сорта Фома – 32 %, но, несмотря на это, масса проростка не уменьшилась относительно контроля. Данный факт объясняется тем, что первичные корешки Фомы останавливали свой рост и обильно покрывались корневыми волосками, что визуально выделяло их среди остальных сортов. Это является признаком алюмоустойчивых сортов зерновых культур [25]. Аналогичный эффект был отмечен у сорта Тобояк, у которого длина проростка достоверно уменьшилась на 22 % при сохранении массы относительно контроля ($F_{\text{факт.}} < F_{\text{теор.}}$ при $p=0,05$).

Сорт Мегион также характеризовался сильным снижением длины проростка (22 %), но при этом у него было зафиксировано максимальное уменьшение массы – 57 % относительно контроля. Это дает право выделить Мегион в группу сортов овса, восприимчивых к ионам алюминия.

Заключение. В ходе проведенных исследований были сделаны соответствующие выводы.

Раствор $Al_2(SO_4)_3$ в концентрации 1 г/литр, соответствующий содержанию подвижного алюминия 10 мг-экв/100 г почвы, обеспечивает достоверное стимулирование ростовых процессов сортов Тобояк – 97 % и Фома – 96 %, при контрольных значениях – 85 и 89 % соответственно. Сорт Отрада не имел достоверного снижения лабораторной всхожести, а Талисман и Мегион – негативно реагировали на ионы алюминия в растворе.

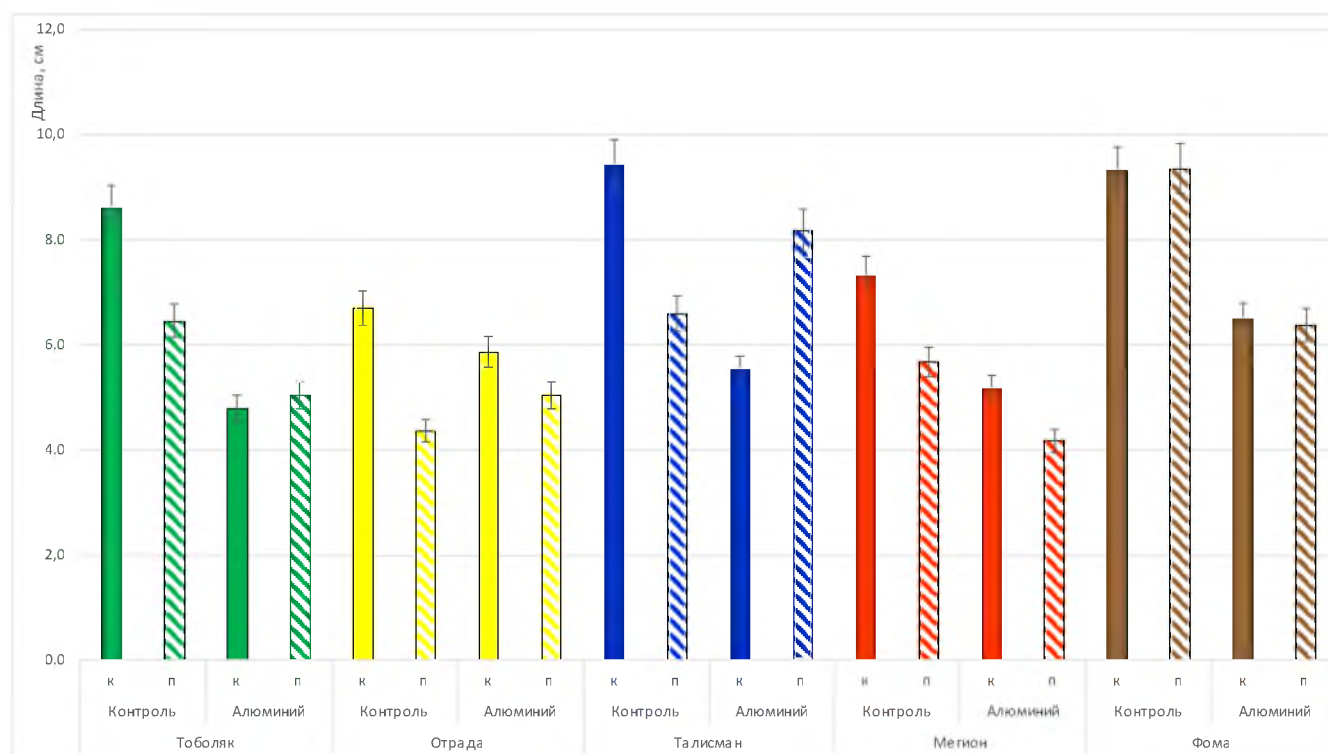


Рисунок 3 – Влияние ионов алюминия на длину первичных корешков (К) и проростков (П) овса, см (HCp_{05} для корешков – 0,4 %; для проростков – 0,3%)

Биомасса проростков (росток+корешок) сортов Отрада, Талисман и Фома при проращивании в растворе сульфата алюминия не отличалась от контроля, что делает их наиболее устойчивыми к токсическому действию алюминия в группе изучаемых сортов. У сортов Тоболяк и Мегион биомасса уменьшилась на 15 и 30 % соответственно. Это также подтверждается данными по длине первичных корешков и ростков.

Максимальный токсический эффект на ранних этапах онтогенеза проявляется в резком уменьшении длины и массы первичных корешков. Наиболее сильно снижали длину корней сорта Тоболяк, (-44 %), Талисман (-41 %), Мегион и Фома, снижение у которых составило 29 и 30 % соответственно. Длина проростков уменьшалась от 22 (Тоболяк) до 32 % (Фома). Также было установлено удлинение первичных корешков у сортов Отрада и Талисман на 15 и 24 % соответственно. Масса корней и проростков изменялась не так сильно.

Таким образом, среди изучаемых сортов овса Тюменской селекции Отрада, Тоболяк и Фома обладают генетической устойчивостью к ионам алюминия и могут быть использованы для их выращивания на почвах, где кислотность обусловлена ионами алюминия. Также они рекомендованы в качестве перспективных родительских форм при селекции алюмоустойчивых сортов для Западной Сибири. Сорт Тоболяк характеризуется алюмотолерантностью на ранних этапах онтогенеза и рекомендован для дальнейшего изучения воздействия на него почвенной кислотности в течение всей вегетации. Сорт Мегион оказался восприимчивыми к токсичному действию ионов алюминия.

Список источников

1. Vardar F. Recent Advances in Aluminum Phytotoxicity // Cellular and Molecular Phytotoxicity of Heavy Metals. 2020. Pp. 335-347. DOI: 10.1007/978-3-030-45975-8_16.
2. Волкова Л.В., Амунова О.С., Тиунова Л.Н. Использование морфофизиологических параметров проростков яровой пшеницы в селекции на алюмоустойчивость // Аграрный вестник Урала. 2021. № 4 (207). С. 24-33. DOI: 10.32417/1997-4868-2021-207-04-24-33.
3. Биологические свойства чернозёма оподзоленного при использовании различных сидеральных культур по системе органического земледелия на Среднем Урале / М.Ю. Карпунин [и др.] // Вестник Курганской ГСХА. 2022. № 3(43). С. 16-25. DOI: 10.52463/22274227_2022_43_16.
4. Кузин Е.Н., Арефьев А.Н., Кузина Е.Е. Изменение продуктивности и качества растениеводческой продукции под влиянием элементов биологического земледелия // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. № 3 (55). С. 40-45.
5. Захаров В.Г., Мишенькина О.Г. Адаптивные свойства новых сортов овса в условиях Средневожского региона // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. № 4 (52). С. 100-107.
6. Окорков В.В. Кислотность почв и меры борьбы с ней // Биологический круговорот питательных веществ при использовании удобрений и биоресурсов в системах земледелия различной интенсификации. Суздаль-Иваново: ПресСто, 2021. С. 10-30.
7. Importance of mineral nutrition for mitigating aluminum toxicity in plants on acidic soils: current status and opportunities / M.A. Rahman [et al.] // International journal of molecular sciences. 2018. Vol. 19. No 10. P. 3073. DOI: 10.3390/ijms19103073.
8. Aluminum toxicity and aluminum stress-induced physiological tolerance responses in higher plants / D.K. Chauhan [et al.] // Critical Reviews in Biotechnology. 2021. Vol. 41. No 5. Pp. 715-730. DOI: 10.1080/07388551.2021.1874282.
9. Aluminum tolerance and micronutrient content in the grain of oat cultivars with different levels of breeding improvement from the VIR collection / I.G. Loskutov [et al.] // Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding. 2022. Vol. 183. No 3. Pp. 96-110. DOI: 10.30901/2227-8834-2022-3-96-110.
10. Яковлева О.В. Фитотоксичность ионов алюминия // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2018. Т. 179. № 3. С. 315-331. DOI: 10.30901/2227-8834-2018-3-315-331.
11. Полняков М.А., Куликова А.Х., Захаров Н.Г. Влияние систем обработки почвы на урожайность культур и качество продукции в звене севооборота горох-овес // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2014. № 1 (25). С. 29-37.
12. Aluminium tolerance of oat cultivars under hydroponic and acid soil conditions. / I. Nava, C. Delatorre, M. Pacheco, P. Scheeren, L. Federizzi // Experimental Agriculture. 2016. No 52(2). Pp. 224-236. DOI: 10.1017/S0014479715000046.
13. Лисицын Е.М. Использование маркерной селекции в создании моделей сортов зерновых культур, устойчивых к абиотическим стрессам // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2018. № 3 (64). С. 4-12. DOI: 10.30766/2072-9081.2018.64.3.04-12.
14. Aluminum toxicity in plants and its possible mitigation in acid soils by biochar: A review / R. Shetty [et al.] // Science of the Total Environment. 2021. Vol. 765. P. 142744. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142744.

15. Асеева Т.А., Зенкина К.В., Трифунтова И.Б. Оценка зерновых яровых культур на устойчивость к алюминию // Достижения науки и техники АПК. 2021. Т. 35. № 4. С. 35-40. DOI: 10.24411/0235-2451-2021-10405.

16. Еремин Д.И., Каюгина С.М. Агрофизические свойства светло-серых лесных почв Северного Зауралья // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2022. № 2 (69). С. 29-34.

17. Аллельное состояние проламин-кодирующих локусов нового сорта овса посевого «Тоболяк» / А.В. Любимова [и др.] // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2022. Т. 183. № 3. С. 123-131. DOI: 10.30901/2227-8834-2022-3-123-131.

18. Любимова А.В., Иваненко А.С. Овёс в Тюменской области // Тюмень, 2021. 172 с.

19. Фомина М.Н., Тоболова Г.В., Остапенко А.В. Использование метода электрофореза проламинов в первичном семеноводстве на примере сорта овса Отрада // Достижения науки и техники АПК. 2016. Т. 30. № 12. С. 14-16.

20. Еремин Д.И., Моисеева М.Н., Любимова А.В. Генетические и агротехнологические особенности формирования посевных качеств овса при различном уровне минерального питания // Аграрный вестник Урала. 2022. № 8(223). С. 27-38. DOI: 10.32417/1997-4868-2022-223-08-27-38.

21. Любимова А.В., Фомина М.Н., Еремин Д.И. Анализ биотипного состава нового сорта овса Фома методом электрофореза запасных белков // Оптимизация селекционного процесса – фактор стабилизации и роста продукции растениеводства Сибири ОСП – 2019: материалы международной научной конференции. Красноярск: ФИЦ «Красноярский НЦ РАН», 2019. С. 79-82.

22. Лисицын Е.М. Методика лабораторной оценки алюмоустойчивости зерновых культур // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2003. № 3. С. 5-7.

23. Амосова Н.В., Николаева О.Н., Сынзыныс Б.И. Механизмы алюмотолерантности у культурных растений (обзор) // Сельскохозяйственная биология. 2007. Т. 42. № 1. С. 36-42.

24. Тулякова М.В., Баталова Г.А., Пермякова С.В. Адаптивный потенциал коллекционных образцов овса пленчатого в условиях Кировской области // Таврический вестник аграрной науки. 2022. № 2 (30). С. 143-154.

25. Посевные качества семян яровых зерновых культур при обработке гуминовым препаратом / А.С. Богатырева [и др.] // Пермский аграрный вестник. 2022. № 4 (40). С. 10-15. DOI: 10.47737/2307-2873_2022_40_10.

References

1. Vardar F. Recent Advances in Aluminum Phytotoxicity. *Cellular and Molecular Phytotoxicity of Heavy Metals*. 2020; 335-347. DOI: 10.1007/978-3-030-45975-8_16.

2. Volkova L.V., Amunova O.S., Tiunova L.N. Ispol'zovanie morfofiziologicheskikh parametrov prorstokov yarovoi pshenitsy v selektsii na alyumoustoichivost' [The use of morphophysiological parameters of spring wheat seedlings in the selection for aluminum resistance]. *Agricultural Bulletin of the Ural*. 2021; (4-207): 24-33. DOI: 10.32417/1997-4868-2021-207-04-24-33. (In Russ).

3. Karpukhin M.Yu. et al. Biologicheskie svoystva chernozema opodzolennogo pri ispol'zovanii razlichnykh sideral'nykh kul'tur po sisteme organicheskogo zemledeliya na Srednem Urале [Biological properties of podzolic chernozem when using various green manure crops according to the organic agriculture system in the Middle Urals]. *Vestnik Kurganskoj GSHA*. 2022; (3-43): 16-25. DOI: 10.52463/22274227_2022_43_16. (In Russ).

4. Kuzin E.N., Arefiev A.N., Kuzina E.E. Izmenenie produktivnosti i kachestva rastenievodcheskoj produktsii pod vliyaniem elementov biologicheskogo zemledeliya [Changes in the productivity and quality of crop products under the influence of elements of biological farming]. *Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy*. 2021; (3-55): 40-45. (In Russ).

5. Zakharov V.G., Mishenkina O.G. Adaptivnye svoystva novykh sortov ovsa v usloviyakh Srednevolzhskogo regiona [Adaptive properties of new varieties of oats in the conditions of the Middle Volga region]. *Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy*. 2020; (4-52): 100-107. (In Russ).

6. Okorkov V.V. *Kislotnost' pochv i mery bor'by s nei* [Soil acidity and measures to combat it Кислотность почв и меры борьбы с ней]. Biological nutrient cycling when using fertilizers and bioresources in farming systems of various intensification. Suzdal-Ivanovo: PresSto; 2021: 10-30. (In Russ).

7. Rahman M.A. et al. Importance of mineral nutrition for mitigating aluminum toxicity in plants on acidic soils: current status and opportunities. *International journal of molecular sciences*. 2018; (19-10): 3073. DOI: 10.3390/ijms19103073.

8. Chauhan D.K. et al. Aluminum toxicity and aluminum stress-induced physiological tolerance responses in higher plants. *Critical Reviews in Biotechnology*. 2021; (41-5): 715-730. DOI: 10.1080/07388551.2021.1874282.

9. Loskutov I.G. et al. Aluminum tolerance and micronutrient content in the grain of oat cultivars with different levels of breeding improvement from the VIR collection. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2022; (183-3): 96-110. DOI: 10.30901/2227-8834-2022-3-96-110.

10. Yakovleva O.V. Fitotoksichnost' ionov alyuminiya [Phytotoxicity of aluminum ions]. *Proceedings on applied botany, genetics and breeding*. 2018; (179-3): 315-331. DOI: 10.30901/2227-8834-2018-3-315-331. (In Russ).
11. Polnyakov M.A., Kulikova A.Kh., Zakharov N.G. Vliyanie sistem obrabotki pochvy na urozhainost' kul'tur i kachestvo produktsii v zvene sevoobrota gorokh-oves [Influence of tillage systems on crop yields and product quality in the pea-oat crop rotation link]. *Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy*. 2014; (1-25): 29-37. (In Russ).
12. Nava I., Delatorre C., Pacheco M., Scheeren P., Federizzi L. Aluminium tolerance of oat cultivars under hydroponic and acid soil conditions. *Experimental Agriculture*. 2016; (52-2): 224-236. DOI: 10.1017/S0014479715000046.
13. Lisitsyn E.M. Ispol'zovanie markernoi selektsii v sozdanii modelei sortov zernovykh kul'tur, ustoychivyykh k abioticheskim stressam [The use of marker selection in the creation of models of varieties of grain crops resistant to abiotic stresses]. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2018; (3-64): 4-12. DOI: 10.30766/2072-9081.2018.64.3.04-12. (In Russ).
14. Shetty R. et al. Aluminum toxicity in plants and its possible mitigation in acid soils by biochar: A review. *Science of the Total Environment*. 2021; (765): 142744. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142744.
15. Aseeva T.A., Zenkina K.V., Trifuntova I.B. Otsenka zernovykh yarovykh kul'tur na ustoychivost' k alyuminiyu [Assessment of spring cereals for resistance to aluminium]. *Achievements of science and technology in agro-industrial complex*. 2021; (35-4): 35-40. DOI: 10.24411/0235-2451-2021-10405. (In Russ).
16. Eremin D.I., Kayugina S.M. Agrofizicheskie svoystva svetlo-serykh lesnykh pochv Severnogo Zaural'ya [Agrophysical properties of light gray forest soils of the Northern Trans-Urals]. *Bulletin of Michurinsk State Agrarian University*. 2022; (2-69): 29-34. (In Russ).
17. Lyubimova A.V. et al. Allel'noe sostoyanie prolamin-kodiruyushchikh lokusov novogo sorta ovsa posevnogo «Tobolyak» [Allelic state of prolamin-coding loci in the new oat cultivar «Tobolyak»]. *Proceedings on applied botany, genetics and breeding*. 2022; (183-3): 123-131. DOI: 10.30901/2227-8834-2022-3-123-131. (In Russ).
18. Lyubimova A.V., Ivanenko A.S. Oves v Tyumenskoj oblasti [Oats in the Tyumen region]. Tyumen; 2021: 172. (In Russ).
19. Fomina M.N., Tobolova G.V., Ostapenko A.V. Ispol'zovanie metoda elektroforeza prolaminov v pervichnom semenovodstve na primere sorta ovsa Otrada [Usage of the method of prolamine electrophoresis in primary seed breeding by the example of Otrada oat variety]. *Achievements of science and technology in agro-industrial complex*. 2016; (30-12): 14-16. (In Russ).
20. Eremin D.I., Moiseeva M.N., Lyubimova A.V. Geneticheskie i agrotekhnologicheskie osobennosti formirovaniya posevnykh kachestv ovsa pri razlichnom urovne mineral'nogo pitaniya [Genetic and agrotechnological features of the formation of sowing qualities of oats at different levels of mineral nutrition]. *Agricultural Bulletin of the Ural*. 2022; (8-223): 27-38. DOI: 10.32417/1997-4868-2022-223-08-27-38. (In Russ).
21. Lyubimova A.V., Fomina M.N., Eremin D.I. Analiz biotipnogo sostava novogo sorta ovsa Foma metodom elektroforeza zapasnykh belkov [Analysis of the biotype composition of the new variety of oat Foma by electrophoresis of storage proteins]. *Proceedings of the international scientific conference «Optimization of the breeding process as a factor in the stabilization and growth of crop production in Siberia OSP – 2019»*. Krasnoyarsk: FITs «Krasnoyarskii NTs RAN»; 2019: 79-82. (In Russ).
22. Lisitsyn E. M. Metodika laboratornoi otsenki alyumoustoychivosti zernovykh kul'tur [Methods of laboratory evaluation of aluminum resistance of grain crops]. *Doklady Rossijskoi akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk*. 2003; (3): 5-7. (In Russ).
23. Amosova N.V., Nikolaeva O.N., Synzynys B.I. Mekhanizmy alyumotolerantnosti u kul'turnykh rastenii (obzor) [Mechanisms of aluminum tolerance in cultivated plants (Review)]. *Agricultural Biology*. 2007; (42-1): 36-42. (In Russ).
24. Tulyakova M.V., Batalova G.A., Permyakova S.V. Adaptivnyi potentsial kolleksiionnykh obraztsov ovsa plenchatogo v usloviyakh Kirovskoi oblasti [Adaptive potential of filmy Avena sativa L. samples under conditions of the Kirov region]. *Taurida herald of the agrarian sciences*. 2022; (2-30): 143-154. (In Russ).
25. Bogatyreva A.S. et al. Posevnye kachestva semyan yarovykh zernovykh kul'tur pri obrabotke guminovym preparatom [Sowing qualities of seeds of spring grain crops when treated with humic preparation]. *Perm Agrarian Journal*. 2022; (4-40): 10-15. DOI: 10.47737/2307-2873_2022_40_10. (In Russ).

Информация об авторах

Д.И. Ерёмин – доктор биологических наук, доцент; AuthorID 318870.

Ю.В. Савельева – AuthorID 1196853.

Information about the author

D.I. Eremin – Doctor of Biological Sciences, Associate Professor; AuthorID 318870.

Yu.V. Savelyeva – AuthorID 1196853.

Статья поступила в редакцию 14.06.2023; одобрена после рецензирования 22.08.2023; принята к публикации 30.08.2023.

The article was submitted 14.06.2023; approved after reviewing 22.08.2023; accepted for publication 30.08.2023.