

DOI 10.5281/zenodo.10259000
EDN GIPGBQ
УДК 633.112.1

Ахтямова А. А., Еремин Д. И.

РЕАКЦИЯ ОВСА НА ВОЗРАСТАЮЩИЙ УРОВЕНЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОВ АЛЮМИНИЯ В ЮВЕНИЛЬНЫЙ ПЕРИОД РАЗВИТИЯ

ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Тюменский научный центр сибирского отделения РАН»»

Реферат. Овёс является третьей по значимости зерновой культурой в России, которая используется в продовольственных и кормовых целях. Овёс, пригодный для Сибирских и Северо-Западных регионов, должен обладать высокой степенью алюмоустойчивости, что возможно только при направленной селекции. Цель исследований – оценка влияния различной концентрации ионов алюминия на проростки овса посевного (*Avena sativa* L.) и определение порога ее токсичности для использования в направленной селекции. Исследования выполнены на базе лаборатории геномных исследований в растениеводстве ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Тюменский научный центр сибирского отделения РАН»» в 2023 г. Для работы был выбран ряд концентраций сульфата алюминия (0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0 и 7,0 г/л) при которых проводили проращивание овса сорта Отрада. Изучали энергию прорастания и лабораторную всхожесть. Определение порога алюмоустойчивости овса проводили по индексу длины первичных корней (ИДК) и биомассе проростков на седьмой день. Установлено, что средняя длина корней опытных образцов овса не отличается от контроля при концентрации сульфата алюминия до 0,5 г/л при индексе длины корней более 95 %. В диапазоне концентраций от 0,75 до 1,00 г/л длина корней уменьшается в 2,0–2,3 раза относительно контроля, а ИДК снижается до 45 %. При дальнейшем повышении концентрации ионов алюминия отмечается сильный токсический эффект, при котором длина корней уменьшается до 8 мм при ИДК 5,4 %. Установлен эффект положительного влияния ионов алюминия при концентрации 0,5–1,0 г/л – лабораторная всхожесть возростала с 75 до 95 %. При последующем повышении концентрации посевные показатели овса снижаются. Фитотоксичность ионов алюминия (y) представлена в виде регрессионного уравнения $y = -1,0224x^2 + 23,098x - 33,842$, где x – концентрация ионов алюминия, г/л. Для выявления алюмоустойчивых генотипов овса рекомендуется метод лабораторной оценки всхожести и сопутствующих показателей при использовании раствора сульфата алюминия с концентрацией 1,0 г/л, обеспечивающей pH 4,1 ед.

Ключевые слова: овёс посевной (*Avena sativa* L.), ионы алюминия, всхожесть, энергия прорастания, индекс длины корней, фитотоксичность, корреляционный анализ.

Для цитирования: Ахтямова А. А., Еремин Д. И. Реакция овса на возрастающий уровень концентрации ионов алюминия в ювенильный период развития // Таврический вестник аграрной науки. 2023. № 4 (36). С. 18–27. EDN: GIPGBQ. DOI: 10.5281/zenodo.10259000.

For citation: Akhtyamova A. A., Eremin D. I. Response of oats to an increasing level of aluminum ion concentration during the juvenile period of development // Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2023. No. 4(36). P. 18–27. EDN: GIPGBQ. DOI: 10.5281/zenodo.10259000.

Введение

Природу высокой кислотности различных типов почв установил еще К. К. Гедройц. По его мнению, которое неоднократно подтвердили современные ученые, почвенный раствор подкисляют преимущественно ионы алюминия и водорода [1, 2]. Несмотря на одинаковый подкисляющий эффект, Al^{3+} обладает токсическим эффектом

для многих растений. По данным исследований А. С. Моторина, овёс на кислых осушенных торфяниках, где кислотность обусловлена ионами водорода, не имеет признаков угнетения вплоть до $pH = 4,5$ ед. [3]. Это подтверждают и другие исследователи [4, 5]. При аналогичном уровне кислотности на серых лесных и подзолистых почвах, овёс и другие культуры испытывают серьезный стресс, который приводит к снижению урожайности [6, 7]. Таким образом, значительная часть сортов овса способна расти при высокой кислотности, обусловленной ионами водорода. Однако в почвах такой вид кислотности встречается редко – в основном это болотно-торфяные почвы и подзолы. В почвенно-поглощительном комплексе кислых почв доминирует алюминий, который способен подкислять почвенный раствор, особенно при внесении физиологически кислых удобрений [8].

Наибольшее негативное влияние оказывает алюминий, который, проникая внутрь растительных клеток, нарушает естественный физиологический процесс их роста. Также происходит нарушение биохимических реакций, что негативно сказывается на качестве получаемой продукции. Установлено, что у растений, произрастающих на кислых почвах, нарушен углеводный обмен, который отвечает за накопление сахаров и крахмала, тем самым ухудшается качество получаемой продукции [9]. Совместные исследования польских и американских ученых показали, что при стрессе ячменя, вызванном высокой концентрацией алюминия, происходят значительные изменения в профиле транскриптома – активизируются более 4000 генов с одновременным подавлением 2000 генов [10].

Проблему кислых почв можно решить несколькими путями. Традиционно, агрохимики рекомендуют проведение известкования. Однако это крайне затратное мероприятие для многих сельскохозяйственных предприятий. В Российской Федерации более чем 35 млн гектар пашни являются изначально кислыми – подзолистые, серые лесные. Еще столько же являются потенциально кислыми [11]. Вопрос о расширении площади пахотных угодий в России остается актуальным и неразрешенным. Наиболее плодородные земли уже распаханы и используются длительный срок, поэтому расширение площади пашни возможно только за счет потенциально кислых серых лесных почв [12].

Еще одним способом решения проблемы почвенной кислотности может быть создание специальных сортов сельскохозяйственных культур, в которых алюмотолерантность закреплена на генетическом уровне. Наиболее подходящей культурой является овес, который известен высокой устойчивостью к кислотности и низкому плодородию почвы [13].

Для оценки алюмотолерантности сортов овса необходимы лабораторные методы скрининга, определяющие перспективные родительские формы для последующей внутривидовой гибридизации. Как отмечают исследователи, еще на стадии ранних этапов онтогенеза овёс (*Avena sativa* L.) показывает наличие генетической устойчивости к ионам алюминия [14]. Это делает метод проращивания семян в питательных растворах с токсичными концентрациями алюминия перспективным при селекции алюмоустойчивых сортов овса.

Одним из нерешенных вопросов является выбор солей алюминия и его концентрация. В водной вытяжке из кислых почв наиболее часто алюминий встречается в форме сульфатов, реже – хлоридов. Поэтому, наиболее правильным будет использование в опытах сульфата алюминия [15]. Однако вопрос о токсической концентрации $Al_2(SO_4)_3$ остается открытым. Поэтому при проведении исследований изучали токсическое воздействие алюминия в разных концентрациях.

Цель исследований – оценка влияния различной концентрации ионов алюминия на проростки овса посевного (*Avena sativa* L.) и определение порога ее токсичности для использования в направленной селекции.

Материалы и методы исследований

Исследования выполнены на базе лаборатории геномных исследований в растениеводстве ФГБУН «Федеральный исследовательский центр “Тюменский научный центр сибирского отделения РАН”» в 2023 г. Метод исследования основан на способности семян овса адекватно реагировать на ионы алюминия путем изменения роста корней в первые семь дней жизни. Объектом исследований был овёс посевной сорта Отрада, который является достижением Тюменской селекции [16, 17]. В настоящее время сорт допущен к выращиванию в трех регионах: Уральский, Западно-Сибирский и Дальневосточный. В Тюменской области Отрада занимает 80 % от засеваемой овсом площади.

Оценку устойчивости к Al^{3+} проводили в лабораторных условиях. Водные растворы сульфат алюминия готовили в концентрации 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0 и 7,0 г/л с сопутствующим замером значений pH. В качестве контроля использовали дистиллированную воду. Образцы на всхожесть закладывали рулонным методом по 25 зерен в четырехкратном повторении (ГОСТ 12038-84). Семена проращивали в термостате при температуре 21 °С. По истечении трех дней подсчитывали долю проросших семян (энергия прорастания), а у семидневных проростков фиксировали всхожесть и поражение плесневыми грибами. Измеряли длину наибольшего корня, массу корней и ростков опытных и контрольных образцов в соответствии вышеуказанному ГОСТ. Индекс длины корней (ИДК) определяли по соотношению средней длины корней контрольных и опытных растений. Фитотоксичность оценивали по биологическому действию водного экстракта сернокислого алюминия на растения, согласно методической рекомендации МР 2.1.7.2297-07 [18]. Математическую обработку данных и дисперсионный анализ проводили с использованием надстройки AgCStat для программного продукта Microsoft Excel, на графиках указана ошибка опыта.

Результаты и их обсуждение

В ходе лабораторных исследований на алюмоустойчивость овса были выявлены существенные различия. Длина корней у семидневных проростков в контроле составляла $149 \pm 1,3$ мм, при этом кислотность раствора была 6,0 pH (таблица 1). Овёс, который прорастал при концентрации Al^{3+} 0,25 и 0,5 г/л, оказался наиболее устойчивым к стрессовому воздействию – индекс длины корня составил 95,3 и 96,6 % соответственно.

Таблица 1 – Влияние концентрации сульфата алюминия на длину первичных корешков при прорастании зерна овса

Вариант (концентрация Al^{3+} , г/л)	pH раствора	Средняя длина корня, мм ($X_{cp} \pm SE$)	Индекс длины корня (ИДК), %
Контроль	6,0	$149 \pm 1,3$	–
0,25	4,3	$142 \pm 1,8$	95,3
0,5	4,2	$144 \pm 0,9$	96,6
0,75	4,1	$74 \pm 1,6$	49,7
1,0	4,1	$67 \pm 1,1$	45,0
1,5	3,9	$37 \pm 1,0$	24,8
2,0	3,9	$33 \pm 1,8$	22,1
3,0	3,8	$16 \pm 0,2$	10,7
4,0	3,8	$12 \pm 0,1$	8,1
5,0	3,7	$11 \pm 0,2$	7,4
7,0	3,7	$8 \pm 0,1$	5,4

Примечание. Хср. – средняя длина, мм; SE – стандартная ошибка, мм.

С увеличением концентрации сульфата алюминия в исследуемых растворах фиксировали закономерное повышение кислотности – рН снижался с 6,0 (контроль) до 3,7 ед. Корреляционный анализ позволил установить, что средняя длина корней проростков овса достоверно зависела от концентрации ионов алюминия в растворе – $F_{\text{факт.}} > F_{\text{теор.}}$ при $p = 0,05$. Коэффициент парной корреляции (концентрация Al^{3+} /длина корней) был равен -0,8, что соответствовало умеренной степени обратной связи. Необходимо отметить, что корреляция (рН/длина корней) была ниже – $r = -0,7$.

Таблица 2 – Взаимосвязь между показателями всхожести семян овса сорта Отрада и концентрацией ионов алюминия

Показатель	Концентрация Al^{3+}	Всхожесть, %	Энергия прорастания, %	Поражение плесневыми грибами, %	рН раствора	Масса корней, г	Масса ростков, г	Фитозэффект, %
Концентрация Al^{3+}	1							
Всхожесть, %	-0,57	1						
Энергия прорастания, %	0,00*	0,13*	1					
Поражение плесневыми грибами, %	-0,78	0,65	-0,04*	1				
рН раствора	-0,57	0,11*	-0,55	0,25*	1			
Масса корней, г	-0,89	0,74	-0,12*	0,89	0,53	1		
Масса ростков, г	-0,87	0,82	0,26*	0,79	0,31*	0,89	1	
Фитозэффект, %	0,80	-0,48	0,53	-0,73	-0,73	-0,87	-0,61	1

Примечание. * – значения корреляционной связи недостоверны. Шкала Е.П. Голубкова для коэффициента корреляции Пирсона (по модулю): 0,00–0,20 – отсутствует; 0,21–0,40 – очень слабая; 0,41–0,60 – слабая; 0,61–0,80 – умеренная; >0,80 – сильная.

Угнетение овса на начальном этапе онтогенеза произошло в вариантах с концентрацией ионов алюминия 0,75 и 1,0 г/л – индекс длины корней уменьшился до 49,7 и 45,0 % соответственно, а длина корней сократилась более чем в два раза относительно контроля. Таким образом, установлено, что сорт Отрада не обладает высокой устойчивостью к токсическому действию ионов алюминия.

Дальнейшее повышение концентрации Al^{3+} в субстратах от 1,5 до 7,0 г/л привело к угнетению корневой системы овса (рисунок 1) – средняя длина корней уменьшилась с 37 до $8 \pm 0,1$ мм. Индекс длины корней при концентрации сульфата алюминия 1,5 г/л составил 24,8 %, а при 7 мг/л – достиг минимальных значений в 5,4 %. Аналогичные данные получили Л. В. Волкова и ее коллеги из Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого в опытах с яровой пшеницей [19]. Ступенчатое снижение длины первичных корешков овса обусловлено тем, что корневые волоски не успевают выделять достаточное количество яблочной и лимонной кислоты, необходимое для связывания ионов алюминия и предотвращения их попадания внутрь клеток корня [20].

Также одним из методов оценки реакции растений на стресс, вызванный абиотическими факторами, является определение показателей энергии прорастания, всхожести и поражения семян плесневыми грибами. Значение энергии прорастания семян характеризуется дружностью всходов на третий день. В контроле данный показатель составлял 14 %. Отмечена положительная динамика (до 69 %) энергии прорастания семян овса относительно контроля на субстратах с концентрацией ионов алюминия до 1,0 г/л (рисунок 2).

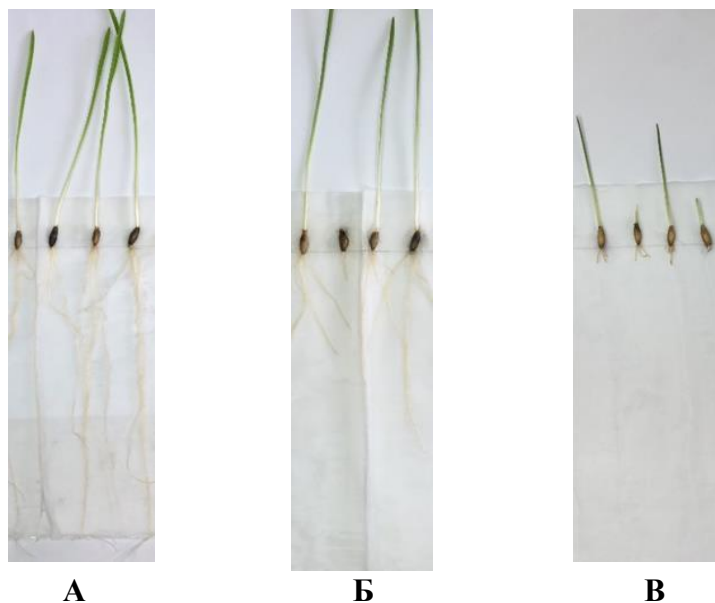


Рисунок 1 – Влияние ионов алюминия на развитие корневой системы семидневных проростков овса сорта Отрада

Примечание. А – Контроль, Б – Al^{3+} 0,75 г/л, В – Al^{3+} 7,0 г/л.

Механизм увеличения энергии прорастания и всхожести овса под действием незначительных концентраций иона алюминия был детально описан в 1990 г. учеными из Мичигана Н. J. Schaeffer и J. D. Walton [21]. Они отмечали резкий выброс внеклеточных полисахаридов из группы β -глюканов, которые обладали стимулирующим эффектом. При сублетальных концентрациях ионов алюминия эти полисахариды ингибировали биохимические реакции вплоть до полной гибели растений. В 2018 г. О. В. Яковлева подтвердила механизм снижения токсического эффекта алюминия благодаря синтезу углеводов и органических кислот путем хелатирования [22]. В ходе исследований установлено, что дальнейшее повышение концентрации Al^{3+} в водном растворе оказало негативное влияние на энергию прорастания, которая уменьшилась до 25 %.

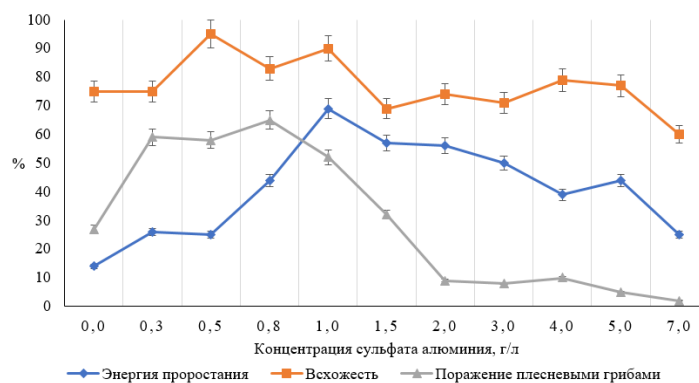


Рисунок 2 – Влияние концентрации сульфата алюминия на прорастание овса при 5 % уровне погрешности

Лабораторная всхожесть в контроле составила 75 %, но при этом отмечали сильное разрастание грибной биоты – поражённость зерновок составляла 27 % (см.

рисунок 1А). Проращивание овса на субстрате с концентрацией ионов алюминия 0,25 г/л не оказало влияния на всхожесть, тогда как поражение проростков плесневыми грибами увеличилось в два раза относительно контроля и составило 59 %, что указывает на явное положительное влияние Al^{3+} . Сильное плесневение растений сохранялось и в вариантах с субстратами до 1,5 г/л.

В вариантах с концентрацией сульфата алюминия 0,5–1,0 г/л был отмечен стимулирующий эффект всхожести семян, которая составила 83–95 %. Дальнейшее повышение концентрации ионов алюминия в субстратах вело к постепенному угнетению ростовых процессов – лабораторная всхожесть овса снизилась до 60 %. Также выявлено резкое снижение (до 2–10 %) пораженности зерновок плесневыми грибами, что соответствует слабой и средней степени поражения.

При воздействии на семена овса раствором сульфата алюминия наблюдали возрастающее влияние эффекта ингибирования развития растений на начальном этапе развития (рисунок 3). В вариантах с концентрацией ионов алюминия до 0,5 г/л фитозэффект составлял 3–5 % относительно контроля, что входит в пределы нормы. С увеличением концентрации Al^{3+} в субстратах до 0,75 г/л наблюдали резкий скачок угнетения проростков (50 %). Дальнейшее повышение концентрации сернокислого алюминия привело к усилению фитозэффекта, достигнув 95 %. Это указывало на высокую корреляционную связь между концентрацией ионов алюминия и фитозэффектом сорта Отрада. Регрессионное уравнение, достоверное в диапазоне содержания ионов алюминия в субстрате до 7,0 г/л, соответствует следующему типу: $y = -1,0224x^2 + 23,098x - 33,842$, где: y – фитозэффект, %; x – концентрация ионов алюминия, г/л. Коэффициент аппроксимации (R^2) составил 0,944.

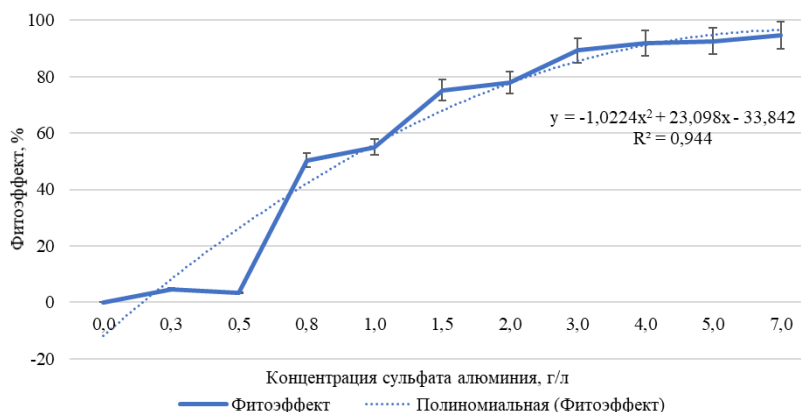


Рисунок 3 – Динамика фитозэффекта овса в зависимости от концентрации сульфата алюминия при 5 % уровне погрешности

Сухая масса корней и ростков у овса на контроле составляла 0,31 и 0,38 г соответственно (рисунок 4). Низкое содержание ионов алюминия в водном растворе не оказало влияния на биомассу относительно контроля. В вариантах с концентрацией Al^{3+} от 0,5 и 1,0 г/л наблюдали увеличение массы ростков на 10–26 % (0,04–0,13 г) в сравнении с контролем. Дальнейшее увеличение содержания ионов алюминия в субстратах негативно сказалось на ростовых процессах овса, что привело к значительному снижению массы корней и ростков – 0,04 и 0,15 г соответственно.

Наши расчеты показали, что лабораторная всхожесть семян овса сорта Отрада находилась в обратной пропорциональной сопряженности относительно концентрации водных растворов ионов алюминия – $r = -0,57$, что по шкале Е. П. Голубкова соответствует слабой степени зависимости. Также отмечается влияние субстратов на поражение плесневыми грибами семян – корреляционный анализ соответствует

умеренной зависимости ($r = -0,78$). Сильная обратная корреляционная сопряженность выявлена для массы корней ($r = -0,89$) и ростков ($r = -0,87$) овса. Фитозэффект относительно концентрации Al^{3+} находился в сильной прямой зависимости – $r = 0,80$.

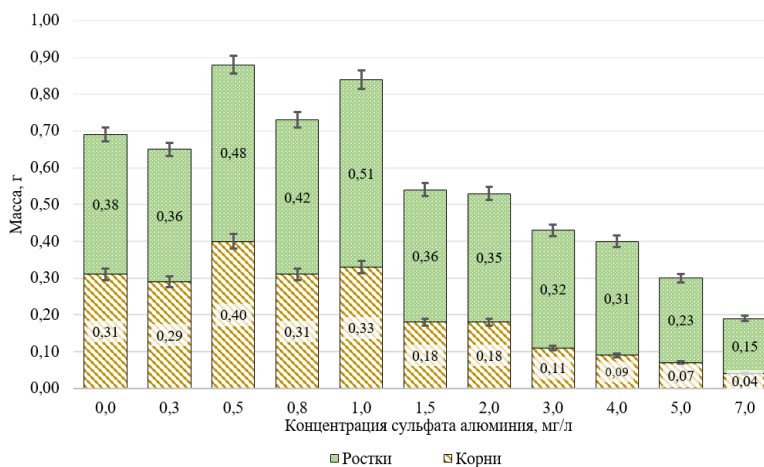


Рисунок 4 – Сухая масса корней и ростков овса в зависимости от концентрации сульфата алюминия при 5 % уровне погрешности

Сильная корреляционная сопряженность выявлена у массы ростков овса относительно всхожести и массы корней – $r = 0,82$ и $r = 0,89$ соответственно. Установлено, что показатель «фитозэффект» имеет сильную обратную пропорциональную зависимость с массой корней овса и составляет $r = -0,87$. Также установлена сильная корреляционная зависимость массы корней относительно поражения семян плесневыми грибами – $r = 0,89$.

Выводы

В ходе модельных опытов установлено, что характер реакции овса на ионы алюминия зависит от его содержания в растворе. При концентрации сульфата алюминия 0,5–0,75 г/л проявляется эффект стимулирования ростовых процессов овса: лабораторная всхожесть повышается с 75 (контроль) до 85–93 %, а биомасса – с 0,69 до 0,88 %. Аналогичный стимулирующий эффект данные концентрации оказали на развитие плесневых грибов – степень поражения зерновок овса составила 52–65 % при 27 % в контроле. Ионы алюминия при концентрации более 1 г/л раствора обеспечивали устойчивое ингибирование ростовых процессов, которое выражалось в энергии прорастания, лабораторной всхожести и фитозэффекте. Наиболее чувствительными к ионам алюминия оказались первичные корешки, масса которых уменьшилась в шесть–восемь раз относительно контроля, а фитозэффект составил 95 %.

На основании проведенных исследований рекомендуется для выявления алюмоустойчивых генотипов овса использовать метод проращивания в растворе с концентрацией сульфата алюминия 1,5 г/л при рН равном 3,9–4,0 ед.

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

Литература

1. Шкуркин С. И., Носиков В. В., Торшин С. П. Основоположник коллоидной химии почв // Плодородие. 2022. № 2(125). С. 71–73. DOI: 10.25680/S19948603.2022.125.17. EDN: TPZPJT.
2. Tolpeshta I. I., Sokolova T. A. Mobile aluminum compounds in soils of the southern taiga (soils of the central forest reserve as an example) // Eurasian Soil Science. 2010. Vol. 43. No. 8. P. 893–904. DOI: 10.1134/S1064229310080065. EDN: MXQATT.

3. Моторин А. С. Торфяные почвы Западной Сибири и их плодородие. Новосибирск: Наука, 2019. 336 с. ISBN 978-5-02-038851-2. EDN TTLGHM.
4. Анисимова Т. Ю., Раскатов В. А. Эффективное использование осушенных торфяников в России // Плодородие. 2020. № 5(116). С. 18–20. DOI: 10.25680/S19948603.2020.116.05. EDN: JXDCZY.
5. Semenov V. M., Zinyakova N. B., Lebedeva T. N., Tulina A. S., Kogut B. M., Masyutenko N. P., Maluykova L. S. Biologically active organic matter in soils of European Russia // Eurasian Soil Science. 2018. Vol. 51. No. 4. P. 434–447. DOI: 10.1134/S1064229318040117. EDN: XXMDTN.
6. Гриб С. И., Богдан В. З. Оптимизация методологии и результаты селекции льна-долгунца в Беларуси // Таврический вестник аграрной науки. 2023. № 1(33). С. 6–18. DOI: 10.5281/zenodo.7896477. EDN: QMWGIE.
7. Loskutov I. G., Butris V., Kosareva I. A., Blinova E. V., Novikova L. Yu. 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. Vol. 183. No. 3. P. 96–110. DOI: 10.30901/2227-8834-2022-3-96-110. EDN: WCLSXA.
8. Hue N. Soil acidity: development, impacts, and management // In book: Structure and Functions of Pedosphere. Springer Nature. 2022. DOI: 10.1007/978-981-16-8770-9_5.
9. Ryan P. R., Tyerman S. D., Sasaki T., Furuichi T., Yamamoto Y., Zhang W. H., Delhaize E. The identification of aluminium-resistance genes provides opportunities for enhancing crop production on acid soils // Journal of Experimental Botany. 2011. No. 62(1) P. 9–20. DOI: 10.1093/jxb/erq272.
10. Szurman-Zubrzycka M., Chwiałkowska K., Niemira M., Kwaśniewski M., Nawrot M., Gajeka M., Larsen P. B., Szarejko I. Aluminum or low pH – which is the bigger enemy of barley? Transcriptome analysis of barley root meristem under Al and low pH stress // Frontiers in Genetics. 2021. Vol. 12. Art. No. 675260. P. 1–23. DOI: 10.3389/fgene.2021.675260.
11. Иванов А. Л., Столбовой В. С., Гребенников А. М., Оглезнев А. К., Петросян Р. Д., Шилов П. М. Ранжирование кислых почв по приоритетности проведения известкования в Российской Федерации // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2020. № 103. С. 168–187. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-168-187. EDN: MNFJYA.
12. Каюгина С. М., Еремин Д. И. Физико-химические свойства серых лесных почв восточной окраины Зауральского Плато // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Биология». 2022. Т. 15. № 4. С. 471–490. DOI: 10.17516/1997-1389-0399. EDN: YOCLPO.
13. Любимова А. В., Иваненко А. С. Овёс в Тюменской области. Тюмень: ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», 2021. 172 с. EDN ARNENM.
14. Косарева И. А., Блинова Е. В., Лоскутов И. Г. Овес: Характеристика образцов по устойчивости к алюмотоксичности кислых почв. Санкт-Петербург: ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н. И. Вавилова», 2021. 44 с. DOI: 10.30901/978-5-907145-77-1. EDN: XHGBTR.
15. Volkova L., Amunova O., Lisitsyn E. Morpho-physiological parameters of wheat cultivar for cultivation on aluminum-acid soils // E3S Web of Conferences. International Scientific and Practical Conference “Fundamental and Applied Research in Biology and Agriculture: Current Issues, Achievements and Innovations” (FARBA 2021). 2021. Vol. 254. Art. No. 01038. DOI: 10.1051/e3sconf/202125401038. EDN: VJXEQV.
16. Фомина М. Н., Брагин Н. А., Белоусов С. А. Влияние агротехнических приемов на формирование качества зерна у сортов овса в условиях Северного Зауралья // Достижения науки и техники АПК. 2021. Т. 35. № 11. С. 31–36. DOI: 10.53859/02352451_2021_35_11_31. EDN: EZYUAO.
17. Любимова А. В., Еремин Д. И., Кочнева Д. А. Изменение показателей генетической структуры популяции сортов овса, возделываемых в Тюменской области, за 90-летний период // Вестник КрасГАУ. 2022. № 12(189). С. 32–41. DOI: 10.36718/1819-4036-2022-12-32-41. EDN: JVDCDC.
18. Русаков Н. В., Крятов И. А., Пиртахия Н. В., Тонкопий Н. И., Карцева Н. Ю., Стародубов А. Г. Обоснование класса опасности отходов производства и потребления по фитотоксичности: методические рекомендации. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2008. 15 с.
19. 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. EDN: EMYMVY.
20. Schneider A. B., Nava I. C., Hervé C. B., Islamovic E., Limberberger E., Jackson E. W., Delatorre C. A. Chromosome-anchored QTL conferring aluminum tolerance in hexaploid oat // Molecular Breeding. 2015. Vol. 35. Art. No. 121. DOI: 10.1007/s11032-015-0315-4.
21. Schaeffer H. J., Walton J. D. Aluminum ions induce oat protoplasts to produce an extracellular (1→3)β-D-Glucan // Plant Physiol. 1990. Vol. 94. P. 13–19. DOI: 10.1104/pp.94.1.13.
22. Яковлева О. В. Фитотоксичность ионов алюминия // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2018. № 179(3). С. 315–331. DOI: 10.30901/2227-8834-2018-3-315-331. EDN: VRVUCP.

References

1. Shkurkin S. I., Nosikov V. V., Torshin S. P. Founder of colloid soil chemistry // *Plodorodie*. 2022. No. 2(125). P. 71–73. DOI: 10.25680/S19948603.2022.125.17. EDN: TPZPJT.
2. Tolpeshta I. I., Sokolova T. A. Mobile aluminum compounds in soils of the southern taiga (soils of the central forest reserve as an example) // *Eurasian Soil Science*. 2010. Vol. 43. No. 8. P. 893–904. DOI: 10.1134/S1064229310080065. EDN: MXQATT.
3. Motorin A. S. Peat soils of Western Siberia and their fertility. Novosibirsk: Nauka, 2019. 336 p. EDN: TTLGHM.
4. Anisimova T. Yu., Raskatov V. A. To the question of effective use of drained peatlands in Russia // *Plodorodie*. 2020. No. 5(116). P. 18–20. DOI: 10.25680/S19948603.2020.116.05. EDN: JXDCZY.
5. Semenov V. M., Zinyakova N. B., Lebedeva T. N., Tulina A. S., Kogut B. M., Masyutenko N. P., Maluykova L. S. Biologically active organic matter in soils of European Russia // *Eurasian Soil Science*. 2018. Vol. 51. No. 4. P. 434–447. DOI: 10.1134/S1064229318040117. EDN: XXMDTN.
6. Grib S. I., Bogdan V. Z. Optimization of methodology and results of flax breeding in Belarus // *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*. 2023. No. 1(33). P. 6–18. DOI: 10.5281/zenodo.7896477. EDN: QMWGIE.
7. Loskutov I. G., Butris V., Kosareva I. A., Blinova E. V., Novikova L. Yu. 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. Vol. 183. No. 3. P. 96–110. DOI: 10.30901/2227-8834-2022-3-96-110. EDN: WCLSXA.
8. Hue N. Soil acidity: development, impacts, and management // In book: *Structure and Functions of Pedosphere*. Springer Nature, 2022. DOI: 10.1007/978-981-16-8770-9_5.
9. Ryan P. R., Tyerman S. D., Sasaki T., Furuichi T., Yamamoto Y., Zhang W. H., Delhaize E. The identification of aluminium-resistance genes provides opportunities for enhancing crop production on acid soils // *Journal of Experimental Botany*. 2011. No. 62(1) P. 9–20. DOI: 10.1093/jxb/erq272.
10. Szurman-Zubrzycka M., Chwiałkowska K., Niemira M., Kwaśniewski M., Nawrot M., Gajecka M., Larsen P. B., Szarejko I. Aluminum or low pH – which is the bigger enemy of barley? Transcriptome analysis of barley root meristem under Al and low pH stress // *Frontiers in Genetics*. 2021. Vol. 12. Art. No. 675260. DOI: 10.3389/fgene.2021.675260.
11. Ivanov A. L., Stolbovoy V. S., Grebennikov A. M., Ogleznev A. K., Petrosyan R. D., Shilov P. M. Ranking of acidic soils by priority of liming in the Russian Federation // *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2020. No. 103. P. 168–187. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-168-187. EDN: MNFJYA.
12. Kayugina S. M., Eremin D. I. Physicochemical properties of gray forest soils of the eastern outskirts of the Trans-Ural Plateau // *Journal of Siberian Federal University. Biology*. 2022. Vol. 15. No. 4. P. 471–490. DOI: 10.17516/1997-1389-0399. EDN: YOCLPO.
13. Lyubimova A. V., Ivanenko A. S. Oats in the Tyumen region. Tyumen: Federal Research Center Tyumen Scientific Center of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2021. 172 p. EDN: ARNENM.
14. Kosareva I. A., Blinova E. V., Loskutov I. G. Oats: description of accessions according to their resistance to aluminum. Saint Petersburg: FSBSI “Federal Research Center N. I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources” (VIR), 2021. 44 p. DOI: 10.30901/978-5-907145-77-1. EDN: XHGBTR.
15. Volkova L., Amunova O., Lisitsyn E. Morpho-physiological parameters of wheat cultivar for cultivation on aluminum-acid soils // *E3S Web of Conferences. International Scientific and Practical Conference “Fundamental and Applied Research in Biology and Agriculture: Current Issues, Achievements and Innovations” (FARBA 2021)*. 2021. Vol. 254. Art. No. 01038. DOI: 10.1051/e3sconf/202125401038. EDN: BJXEQV.
16. Fomina M. N., Bragin N. A., Belousov S. A. Influence of agrotechnical methods on the formation of grain quality in oat varieties under conditions of the Northern Trans-Urals // *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2021. Vol. 35. No. 11. P. 31–36. DOI: 10.53859/02352451_2021_35_11_31. EDN: EZYAYO.
17. Lyubimova A. V., Eremin D. I., Kochneva D. A. Changes in indicators of the oat varieties population genetic structure in the Tyumen region over a 90-year period // *Bulletin of KSAU*. 2022. No. 12(189). P. 32–41. DOI: 10.36718/1819-4036-2022-12-32-41. EDN: JVDCCD.
18. Rusakov N. V., Kryatov I. A., Pirtakhiya N. V., Tonkopiya N. I., Kartseva N. Yu., Starodubov A. G. Justification of the phytotoxicity hazard class of industrial and consumer waste: methodological recommendations. Moscow: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2008. 15 p.
19. Volkova L. V., Amunova O. S., Tiunova L. N. The use of morphophysiological parameters of spring wheat seedlings in the selection for aluminum resistance // *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2021. No. 4(207). P. 24–33. DOI: 10.32417/1997-4868-2021-207-04-24-33. EDN: EMYMVY.
20. Schneider A. B., Nava I. C., Hervé C. B., Islamovic E., Limberberger E., Jackson E. W., Delatorre C. A. Chromosome-anchored QTL conferring aluminum tolerance in hexaploid oat // *Molecular Breeding*. 2015. Vol. 35. P. Art. No. 121. DOI: 10.1007/s11032-015-0315-4.
21. Schaeffer H. J., Walton J. D. Aluminum ions induce oat protoplasts to produce an extracellular (1→3)β-D-glucan // *Plant Physiol*. 1990. Vol. 94. P. 13–19. DOI: 10.1104/pp.94.1.13.
22. Yakovleva O. V. Phytotoxicity of aluminum ions // *Proceedings on applied botany, genetics and breeding*. 2018. No. 179(3). P. 315–331. DOI: 10.30901/2227-8834-2018-3-315-331. EDN: VRVUCP.

UDC 633.112.1

Akhtyamova A. A., Eremin D. I.

RESPONSE OF OATS TO AN INCREASING LEVEL OF ALUMINUM ION CONCENTRATION DURING THE JUVENILE PERIOD OF DEVELOPMENT

Summary. Oats (*Avena sativa* L.) rank third in importance among cereal crops in Russia and serve as a food source for humans and livestock. Achieving high aluminum resistance is crucial for oat cultivation in Siberian and North-Western regions, which can only be gained through controlled breeding. The aim of the work was to evaluate the effect of different concentrations of aluminum ions on *A. sativa* seedlings and to determine the threshold of its toxicity for further use in controlled breeding. The studies were carried out in 2023 at the Laboratory of Genomic Research in Plant Breeding – structural unit of Tyumen Scientific Center SB RAS. In the course of the research, oats seeds (cv. ‘Otrada’) were germinated at different aluminum sulfate concentrations (0.25; 0.50; 0.75; 1.0; 1.5; 2.0; 3.0; 4.0; 5.0 and 7.0 g/l). Particular attention was paid to such indicators as germination energy and laboratory germination. Determination of the threshold of oats resistance to the effects of Al was carried out by the primary root length index (RLI) and biomass of seedlings on the 7th day. In laboratory experiments, it was found that the average root length of oats did not vary from that of the control group at concentrations of up to 0.5 g/liter (RLI > 95 %). At concentrations from 0.75 to 1.0 g/l, root length decreased by 2.0–2.3 times compared to control values; RLI = 45 %. Further increase in the concentration of aluminum ions caused strong toxic effect; root length decreased to 8 mm, RLI dropped to 5.4 %. The effect of the positive influence of aluminum ions at concentrations from 0.5 to 1.0 g/l was observed: laboratory germination increased from 75 to 95%. Subsequent increase in concentration led to a decrease in the sowing quality of oats. The phytotoxicity of aluminum ions (y) was represented as a regression equation $y = -1.0224x^2 + 23.098x - 33.842$, where x is the concentration of aluminum ions, g/l. To identify Al resistant genotypes of oats, it is recommended to use the method of laboratory evaluation of germination and related indicators under the following conditions: aluminum sulfate concentration – 1.0 g/l, pH equal to 4.1.

Keywords: *Avena sativa* L., aluminum ions, germination, germination energy, root length index, phytotoxicity, correlation analysis.

Ахтямова Анастасия Андреевна, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории геномных исследований в растениеводстве, ФГБУН «Федеральный исследовательский центр “Тюменский научный центр сибирского отделения РАН”»; Россия, 625501, Тюменская область, п. Московский, ул. Бурлаки, 2; e-mail: gen.i72@mail.ru.

Ерёмин Дмитрий Иванович, доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории геномных исследований в растениеводстве, ФГБУН «Федеральный исследовательский центр “Тюменский научный центр сибирского отделения РАН”»; Россия, 625501, Тюменская область, п. Московский, ул. Бурлаки, 2; e-mail: soil-tyumen@yandex.ru.

Akhtyamova Anastasia Andreevna, Cand. Sc. (Agr.), senior researcher, Laboratory of genomic research in plant breeding, Tyumen Scientific Center SB RAS; 2, Burlaki str., Moskovsky village, Tyumen region, 625501, Russia; e-mail: gen.i72@mail.ru.

Eremin Dmitry Ivanovich, Dr. Sc. (Biol.), associate professor, leading researcher at the Laboratory of genomic research in plant breeding, Tyumen Scientific Center SB RAS; 2, Burlaki str., Moskovsky village, Tyumen region, 625501, Russia; e-mail: soil-tyumen@yandex.ru.

Дата поступления в редакцию – 18.10.2023

Дата принятия к печати – 20.11.2023