

## СОРТОВАЯ РЕАКЦИЯ ОВСА ТЮМЕНСКОЙ СЕЛЕКЦИИ НА ВОЗРАСТАЮЩИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОВ АЛЮМИНИЯ В ЮВЕНИЛЬНЫЙ ПЕРИОД

**А. А. Ахтямова**, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории геномных исследований в растениеводстве, gen.i72@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0297-6958;

**Д. И. Еремин**, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геномных исследований в растениеводстве, soil-tyumen@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-3672-6060;

**Ю. В. Савельева**, младший научный сотрудник лаборатории геномных исследований в растениеводстве, savelyeva25@mail.ru, ORCID ID: 0009-0002-8445-3754

НИИСХ СЗ – филиал ТюмНЦ СО РАН,  
625501, Тюменская обл., Тюменский р-н, п. Московский, ул. Бурлаки, д. 2.

Цель исследования – изучение алюмоустойчивости генотипов овса посевного (*Avena sativa* L.) на ранних этапах онтогенеза. Овес является ценной культурой и широко используется для производства кормов и продовольствия. Объектом испытаний были 6 сортов овса посевного (Отрада, Фома, Талисман, Тоболяк, Сириус, Радужный). На примере сорта Тоболяк (к-15887), был заложен опыт 1 по влиянию уровня pH раствора на ростовую активность семидневных растений. Используя серную кислоту, pH дистиллированной воды довели до 3,6 ед. В качестве контроля использовали дистиллированную воду с pH, равным 6,0 ед. Водные растворы сульфата алюминия для опыта 2 готовили в концентрациях 1,5; 3,0; 5,0 г/л, что соответствовало 4, 9 и 15 ммоль/л. Установлено, что независимо от исследуемого варианта pH раствора 6,0 и 3,0 ед. не оказало существенного влияния на ростовую активность в ювенильный период, визуально растения выглядели здоровыми – отсутствовали изменения корневой системы по цвету и форме, как и у проростков. Установлена сортовая реакция овса на токсическое действие возрастающей концентрации ионов алюминия. Наиболее устойчивым к воздействию ионов алюминия с концентрацией 4 и 9 ммоль/л в растворе был сорт Тоболяк – индекс длины корня семидневных проростков растений составлял 57 и 20 % относительно контроля. Наиболее сильный эффект торможения развития растений овса отмечается у сорта Отрада на варианте с концентрацией  $Al^{3+}$  4 ммоль/л – индекс длины корня составил 25 % относительно контроля. Была определена зависимость, выражаемая следующим уравнением регрессии:  $y = 0,7x^2 - 20,15x - 157,4$ , где  $y$  – длина корней на седьмые сутки прорастания, мм;  $x$  – концентрация  $Al^{3+}$  в растворе, ммоль/л. При этом индекс детерминации ( $R^2$ ) равен 1, что соответствует идеальной модели линии регрессии, доказывая зависимость длины корня ростков овса от концентрации  $Al^{3+}$  в растворе.

**Ключевые слова:** абиотические факторы, стресс растений, кислые почвы, овес посевной (*Avena sativa* L.), ионы алюминия, индекс длины корня, алюмоустойчивые генотипы.

**Для цитирования:** Ахтямова А. А., Еремин Д. И., Савельева Ю. В. Сортовая реакция овса тюменской селекции на возрастающие концентрации ионов алюминия в ювенильный период // Зерновое хозяйство России. 2025. Т. 17, № 4. С. 47–53. DOI: 10.31367/2079-8725-2025-99-4-47-53.



## VARIETAL RESPONSE OF OATS OF TYUMEN BREEDING TO INCREASING ALUMINUM ION CONCENTRATIONS IN THE JUVENILE PERIOD

**A. A. Akhtyamova**, Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher Laboratory of Genomic Research in Crop Production, gen.i72@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0297-6958;

**D. I. Eremin**, Doctor of Biological Sciences, leading Researcher Laboratory of Genomic Research in Crop Production, soil-tyumen@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-3672-6060;

**Yu. V. Savelyeva**, Junior Researcher Laboratory of Genomic Research in Crop Production, savelyeva25@mail.ru, ORCID ID: 0009-0002-8445-3754

Scientific Research Institute of Agriculture for Northern Trans-Urals – Branch of Federal State Institution, Federal Research Center, Tyumen Scientific Center of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
625501, Tyumen region, Moskovsky, Burlaki Str., 2.

The purpose of the current study was to investigate the aluminum resistance of oat genotypes (*Avena sativa* L.) at early stages of ontogenesis. Oats is a valuable crop which is widely used for feed and food production. The objects of the tests were 6 oat varieties ('Otrada', 'Foma', 'Talisman', 'Tobolyak', 'Sirius', 'Raduzhny'). Using the oat variety 'Tobolyak' (k-15887) as an example, there was conducted experiment 1 to examine the effect of the pH level of the solution on the growth activity of seven-day-old plants. Using sulfuric acid, the pH of distilled water was brought to 3.6 units. Distilled water with a pH of 6.0 units was used as a control. Water solutions of aluminum sulfate for experiment 2 were prepared in concentrations of 1.5; 3.0; 5.0 g/l, which corresponded to 4, 9, and 15 mmol/l. There has been established that regardless of the studied variant, the pH of the solution of 6.0 and 3.0 units had a slight effect on growth activity in the juvenile period, visually the plants looked healthy since there were no changes in color and shape of the root system, as these of the sprouts. There has been identified a varietal reaction of oats to the toxic effect of increasing aluminum ion concentrations. The most resistant to the effects of an aluminum ion concentration of 4 and 9 mmol/l in the solution was the variety 'Tobolyak', the root length index of seven-day plant sprouts

was 57 and 20 % relative to the control. The strongest effect of inhibition of oat plant development was established in the variety 'Otrada' in the variant with an  $Al^{3+}$  concentration of 4 mmol/l, the root length index was 25% relative to the control. There has been determined a dependence expressed by the regression equation  $y = 0.7x^2 - 20.15x - 157.4$  where  $y$  is the length of the roots on the seventh day of germination, mm;  $x$  is the concentration of  $Al^{3+}$  in the solution, mmol/l. In this case, the determination index ( $R^2$ ) is equal to 1, which corresponds to the ideal model of the regression line, proving the dependence of the root length of oat sprouts on the concentration of  $Al^{3+}$  in the solution.

**Keywords:** abiotic factors, plant stress, acidic soils, oats (*Avena sativa* L.), aluminum ions, root length index, aluminum-resistant genotypes.

**Введение.** Снижение продуктивности сельскохозяйственных культур на кислых почвах достаточно давно известно и хорошо изучено (Шкуркин и др., 2022). Многими исследователями было доказано, что растения угнетаются не кислотностью, а токсичным действием ионов алюминия, которые также обуславливают кислую среду. Особенно негативное его влияние проявляется на средне- (pH 4,5–5,0) и сильнокислых (pH < 4,5) почвах. Отдельные сельскохозяйственные культуры испытывают стресс от ионов алюминия даже на слабокислых почвах (pH 5,1–5,5) (Huanhuan et al., 2020).

Проникая внутрь растительной клетки, ионы алюминия нарушают биохимические реакции, что приводит к нарушению физиологического развития на протяжении всей вегетации растений. При систематическом воздействии ионов алюминия на корневую систему отмечается достоверное снижение продуктивности и качества сельскохозяйственных культур вплоть до полной гибели посевов (Vishnyakova et al., 2015). Учитывая тот факт, что почти половина площади пахотного фонда России располагается на почвах с различной кислотностью (Какюгина и Еремин, 2022), следует признать достаточно высокий уровень недобора сельскохозяйственной продукции из-за токсичности ионов алюминия в почве. Также ситуацию усугубляет возрастающая антропогенная нагрузка в сельском хозяйстве, приводящая к повышению кислотности почв с последующим накоплением ионов алюминия в почвенно-поглощающем комплексе.

В географическом понимании Россия считается страной умеренного климата – ее основные площади расположены в таежной и лесостепной зонах. Типичными почвами для этих зон считают подзолистые и серые лесные, которые относятся к категории земель с повышенной кислотностью. По мнению А. Л. Иванова и его коллег (2023), площадь подзолистых и серых лесных почв в России превышает 65 млн га, основная часть которых до настоящего времени не использована. Современная концепция расширения сельского хозяйства в России основана на вовлечении именно этих почв, поэтому необходимо решать проблему высокой кислотности и алюмотоксичности уже сейчас.

В работе О. В. Яковлевой и А. М. Капешинского (2012) отмечается, что для эффективного использования кислых почв необходим комплексный подход, начиная от выбора технологии возделывания и заканчивая использованием новых сортов сельскохозяйственных культур, обладающих высокой резистентностью к токсическому действию ионов

алюминия. Наиболее эффективным приемом принято считать известкование, которое нейтрализует почвенную кислотность и тем самым снижает токсичность ионов алюминия в почве. В Российской Федерации в известковании остро нуждается треть пахотного фонда (Аканова, 2023), поэтому необходим переход на новые сорта сельскохозяйственных культур, у которых присутствует генетическая алюмоустойчивость. Наименее чувствительной среди зерновых культур к высокой кислотности и способной успешно формировать стабильный урожай при дефиците питательных веществ в почве принято считать овес. В ходе многолетней селекции было создано большое количество сортов овса интенсивного типа, но вместе с тем частично была утрачена их генетическая устойчивость к токсическому действию алюминия (Loskutov et al., 2022).

В связи с особенностью почвенного покрова Сибирских и Северо-Западных регионов современные сорта овса должны обладать устойчивостью к повышенной концентрации ионов алюминия в почве. Это возможно только при введении в селекционный процесс наиболее устойчивых генотипов.

Наиболее яркая реакция на ионы алюминия у растений происходит на ранних этапах прорастания, что дает возможность быстрого и качественного выявления алюмоустойчивых генотипов. Как показали исследования ученых из Всероссийского института генетических ресурсов, существует очень высокая корреляция между алюмоустойчивостью генотипов овса на ранних этапах онтогенеза и продуктивностью (Косарева и др., 2021). К этому же заключению пришла группа ученых под руководством Н. В. Давыдовой (2022), проведя комплексные исследования по устойчивости яровой пшеницы к токсическому действию алюминия. В ходе испытания им удалось выделить алюмоустойчивые селекционные линии с высокой продуктивностью. В настоящее время уже известно, что толерантность к ионам алюминия обусловлена степенью их проникновения в корневые волоски. Тогда как устойчивость к токсическому действию алюминия подразумевает исключение его проникновения в цитозоль клетки, что определяется полигенным типом наследования (Яковлева и др., 2012). Цель исследования – изучение алюмоустойчивости генотипов овса посевного (*Avena sativa* L.) на ранних этапах онтогенеза.

**Материалы и методы исследований.** Изучение реакции овса на различные концентрации ионов алюминия проводили в лаборатории геномных исследований в расте-

ниеводстве Научно-исследовательского института сельского хозяйства Северного Зауралья в 2024 году. Объектом испытаний были 6 сортов овса посевного (Отрада, Фома, Талисман, Тобояк, Сириус, Радужный), которые являются селекционным достижением института. Подробная характеристика сортов приведена в ранее опубликованных работах (Иванова и др., 2023). Данные сорта себя успешно зарекомендовали и имеют широкое распространение как в Тюменской области (около 80 % от засеваемой площади), так и в соседних регионах.

На примере сорта овса Тобояк (к-15887) был заложен опыт 1 по влиянию уровня pH раствора на ростовую активность семидневных растений. Используя серную кислоту, pH дистиллированной воды довели до 3,6 ед. В качестве контроля использовали дистиллированную воду.

Исследования в опыте 2 основаны на способности семян овса посевного (*Avena sativa* L.) реагировать на изменение концентрации ионов алюминия в используемом при проращивании семян растворе. Водные растворы сульфата алюминия ( $Al_2(SO_4)_3$ ) готовили с концентрацией 1,5; 3,0; 5,0 г/л, что соответствует 4, 9 и 15 ммоль/л. Перед закладкой опыта в растворах определяли значения pH.

Определение всхожести семян проводили согласно ГОСТ 12038-85 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести». На листе увлажненной соответствующим раствором фильтровальной бумаги раскладывали семена овса зародышами вниз по линии, проведенной на расстоянии 3 см от верхнего края листа. Сверху семена накрывали увлажненным листом бумаги, затем не-

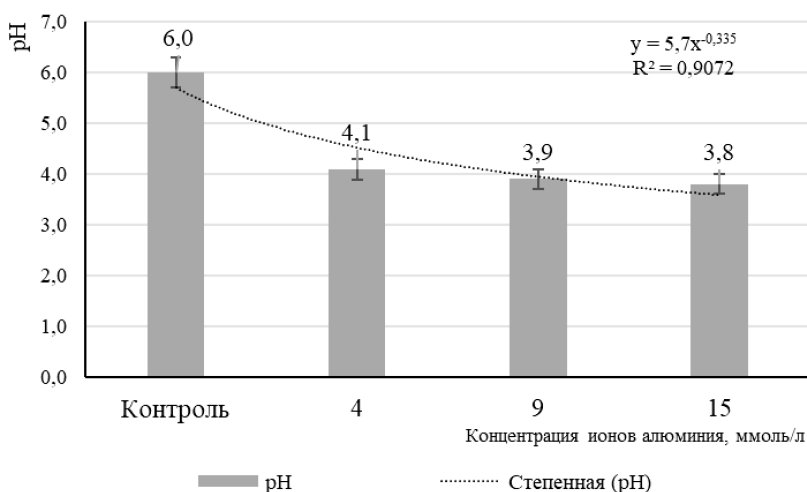
плотно сворачивали в рулон и помещали в вертикальном положении в емкость с раствором. Для создания необходимых условий для прорастания зерна опытные образцы размещали в электрическом суховоздушном термостате ТС-1/80 СПУ и проращивали при температуре 20 °С. По истечении семи дней у проростков был произведен замер длины наибольшего корня каждого проростка на всех вариантах и контроле. Расчет индекса длины корней проводили по формуле 1:

$$\text{ИДК} = L_{\text{оп}} / L_{\text{к}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где: ИДК – индекс длины корня, %;  $L_{\text{к}}$  – длина корня контрольного образца, мм;  $L_{\text{оп}}$  – длина корня опытного образца, мм.

Математическую обработку данных и дисперсионный анализ проводили с использованием надстройки AgCStat для программного продукта Microsoft Excel (Гончар-Зайкин и др., 2003).

**Результаты и их обсуждение.** В начале исследований по изучению алюмоустойчивости сортов овса был определен уровень pH растворов при концентрации ионов алюминия от 4 до 15 ммоль/л (рис. 1). Значение pH дистиллированной воды, используемой на контроле, составило 6,0 ед., что соответствовало слабокислой реакции. Растворы сульфата алюминия характеризовались кислой реакцией – pH составил 3,8–4,1 ед. Достоверная разница была только между значениями pH в растворах с концентрацией ионов алюминия 4 и 15 ммоль/л ( $F_{\text{факт.}} > F_{\text{теор.}}$  при  $p = 5,0 \%$ ).



**Рис. 1.** Влияние различной концентрации  $Al^{3+}$  на реакцию среды (pH) водного раствора при 5%-м уровне погрешности, ед.

**Fig. 1.** Effect of different concentrations of  $Al^{3+}$  on the reaction of pH of a water solution at a 5% error level, units

В ходе исследований была установлена высокая связь между концентрацией ионов алюминия и реакцией среды (pH) раствора. Регрессионное степенное уравнение досто-

верно в диапазоне содержания ионов алюминия в растворе до 15 ммоль/л. Коэффициент аппроксимации ( $R^2$ ) составил 0,9072. Уравнение соответствует следующему типу:

$$y = 5,7x^{-0,335}, \quad (2)$$

где:  $y$  – реакцией среды (рН) раствора, ед.;  $x$  – концентрация  $Al^{3+}$  в растворе, ммоль/л.

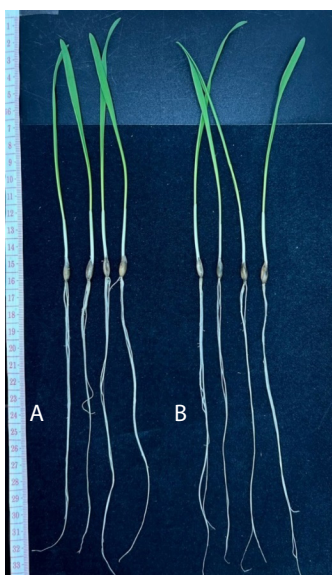
По истечении семи дней проращивания зерна овса сорта Тоболяк было установлено, что средняя длина корня на варианте с рН 3,6 ед. стала больше на 12 мм относительно

контроля, а сухая масса проростков уменьшилась на 28 мг (табл. 1). Независимо от исследуемого варианта, рН раствора 6,0 и 3,0 ед. не оказало существенного влияния на ростовую активность, визуально растения выглядели здоровыми – отсутствовали изменения корневой системы по цвету и форме, как и у проростков (рис. 2).

**Таблица 1. Влияние кислотности водного раствора на ростовую активность семидневных проростков овса сорта Тоболяк**  
**Table 1. Effect of acidity of a water solution on the growth activity of seven-day oat sprouts of the variety 'Tobolyak'**

| рН раствора            | Лабораторная всхожесть, % ( $X_{cp} \pm SE$ ) | Средняя длина корня, мм ( $X_{cp} \pm SE$ ) | Сухая масса корней, мг | Сухая масса проростков, мг | Индекс СКП |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------|----------------------------|------------|
| 6,0                    | 86±1,0                                        | 157±0,7                                     | 82±4                   | 138±2                      | 0,6        |
| 3,6                    | 88±0,9                                        | 169±0,8                                     | 85±2                   | 110±3                      | 0,8        |
| Среднее по группе, n=2 | 87                                            | 163                                         | 84                     | 124                        | 0,7        |

$X_{cp}$  – средняя длина корня, мм; SE – стандартная ошибка, мм;  
СКП – соотношение массы корней и побегов



**Рис. 2. Влияние кислотности водного раствора на длину корневой системы семидневных проростков овса сорта Тоболяк (А – рН-6,0 ед., В – рН 3,6 ед.)**

**Fig. 2. Effect of acidity of a water solution on the length of the root system of seven-day oat sprouts of the variety 'Tobolyak' (A – рН 6.0 units, B – рН 3.6 units)**

Далее были проведены исследования по влиянию возрастающей концентрации ионов алюминия в растворе на ростовую актив-

ность растений овса. На седьмые сутки проращивания овса на дистиллированной воде у сорта Тоболяк была зафиксирована максимальная длина первичных корешков – 157±0,7 мм, что на 6 % длиннее сортов Отрада и Фома (табл. 2). Сорта Талисман и Радужный характеризовались минимальной длиной корешков – 127±1,1 и 116±0,9 мм соответственно. Столь существенная разница в длине первичных корней при отсутствии каких-либо различий является сортовыми особенностями овса.

Ионы алюминия в концентрации 4 ммоль/л оказали негативное влияние на прорастание семян овса. Длина корней была в 2–4 раза меньше по сравнению с контролем. Максимальная длина первичных корешков была отмечена у сорта Тоболяк – 89±1,8 мм, индекс длины корня составил 57 % относительно контроля (табл. 3). Менее устойчивыми к  $Al^{3+}$  проявили себя сорта овса Талисман и Радужный, значения ИДК достигли 45 и 46 % соответственно. Относительно контроля почти в 3 раза уменьшилась длина корня у сортов Фома и Сириус (52±0,9 и 47±1,2 мм соответственно), при этом ИДК составлял 35 и 34 % относительно контроля. Наиболее сильное угнетение при концентрации  $Al^{3+}$  4 ммоль/л наблюдалось у сорта Отрада (средняя длина корешков – 37±1,0 мм, ИДК – 25 %).

**Таблица 2. Длина корня семидневных проростков овса в зависимости от концентрации ионов алюминия ( $X_{cp} \pm SE$ ), мм**  
**Table 2. Root length of seven-day oat sprouts depending on the aluminum ion concentration ( $X_{av} \pm SE$ ), mm**

| Сорт (фактор А) | Концентрация $Al^{3+}$ , ммоль/л (фактор В) |        |        |        |
|-----------------|---------------------------------------------|--------|--------|--------|
|                 | Контроль                                    | 4      | 9      | 15     |
| Отрада          | 149±1,3                                     | 37±1,0 | 16±0,2 | 11±0,2 |
| Фома            | 148±1,0                                     | 52±0,9 | 20±0,1 | 12±0,1 |
| Талисман        | 127±1,1                                     | 57±0,8 | 23±0,3 | 12±0,1 |
| Тоболяк         | 157±0,7                                     | 89±1,8 | 32±0,9 | 13±0,1 |
| Сириус          | 137±1,3                                     | 47±1,2 | 18±0,6 | 11±0,2 |
| Радужный        | 116±0,9                                     | 53±0,7 | 22±0,5 | 12±0,3 |

$X_{cp}$  – средняя длина, мм; SE – стандартная ошибка, мм;

НСР<sub>05</sub> по фактору А = 1,2; НСР<sub>05</sub> по фактору В = 1,6; НСР<sub>05</sub> по взаимодействию АВ = 2,2



**Таблица 3. Влияние концентрации сульфата алюминия на индекс длины корней (ИДК) на седьмые сутки прорастивания овса, % относительно контроля**  
**Table 3. Effect of aluminum sulfate concentration on the root length index (RLI) on the seventh day of oat germination, % relative to the control**

| Сорт<br>(фактор А) | Концентрация $Al^{3+}$ , ммоль/л (фактор В) |    |    |
|--------------------|---------------------------------------------|----|----|
|                    | 4                                           | 9  | 15 |
| Отрада             | 25                                          | 11 | 7  |
| Фома               | 35                                          | 14 | 8  |
| Талисман           | 45                                          | 18 | 9  |
| Тоболяк            | 57                                          | 20 | 8  |
| Сириус             | 34                                          | 13 | 8  |
| Радужный           | 46                                          | 19 | 10 |

$HCP_{05}$  по фактору А = 1,0;  $HCP_{05}$  по фактору В = 1,1;  $HCP_{05}$  по взаимодействию АВ = 1,2

При токсическом действии  $Al^{3+}$  угнетается развитие первичных корешков растений овса (корешки укорачиваются и уплотняются, приобретая желтоватый оттенок), что объясняется попаданием ионов алюминия внутрь растительной клетки. На рисунке 3 представлен наглядный пример развития корневой системы у овса сорта Тоболяк при токсическом воздействии ионов алюминия.



**Рис. 3.** Влияние ионов алюминия на развитие корневой системы семидневных проростков овса сорта Тоболяк (А – Контроль, Б –  $Al^{3+}$  4 ммоль/л, В –  $Al^{3+}$  9 ммоль/л, Г –  $Al^{3+}$  15 ммоль/л)

**Fig. 3.** Effect of aluminum ions on the development of the root system of seven-day oat sprouts of the variety 'Tobolyak' (A – Control, B –  $Al^{3+}$  4 mmol/l, B –  $Al^{3+}$  9 mmol/l, D –  $Al^{3+}$  15 mmol/l)

Увеличение концентрации  $Al^{3+}$  в водном растворе до 9 ммоль/л привело к уменьшению длины корня растений овса изучаемых сортов в 4–9 раз относительно контроля, достигнув 16–32 мм. При концентрации  $Al^{3+}$  9 ммоль/л наиболее устойчивым к токсическому воздействию был сорт Тоболяк – индекс

длины корня составил 20 % относительно контроля (длина корня –  $32 \pm 0,9$  мм). Под воздействием стресса у сортов Талисман и Радужный длина корня составляла  $23 \pm 0,3$  и  $22 \pm 0,5$  мм (ИДК – 18 и 19 %) соответственно. Менее устойчивыми к воздействию  $Al^{3+}$  с концентрацией 9 ммоль/л в водном растворе были сорта овса Отрада, Фома и Сириус – индекс длины корня варьировал от 11 до 14 % относительно контроля, при этом длина корня была в диапазоне от  $16 \pm 0,2$  до  $20 \pm 0,1$  мм.

Высокие концентрации ионов алюминия (15 ммоль/л) оказали негативное влияние на длину корней семидневных проростков овса изучаемых сортов, достигнув 11–13 мм, при этом максимальные значения ИДК отмечались у сорта Радужный (10 % относительно контроля). Ингибирование деления растительных клеток вызвано алюмотоксичностью, что в результате привело к задержке развития первичных корешков и, как следствие, к снижению поглощения воды растением овса. С учетом динамики изменения длины корня у растений изучаемых сортов наиболее устойчивым к воздействию  $Al^{3+}$  был сорт Тоболяк. В связи с этим было рассчитано квадратичное регрессионное уравнение, которое достоверно в диапазоне содержания  $Al^{3+}$  в растворе до 15 ммоль/л. Индекс детерминации ( $R^2$ ) равен 1, что соответствует идеальной модели линии регрессии, доказывая зависимость длины корня ростков овса от концентрации  $Al^{3+}$  в растворе. Уравнение соответствует следующему типу:

$$y = 0,7x^2 - 20,15x - 157,4, \quad (3)$$

где:  $y$  – длина корня семидневных проростков овса, мм;  $x$  – концентрация ионов алюминия в растворе, ммоль/л.

**Выводы.** Установлено, что pH водного раствора 6,0 и 3,6 ед. не оказывают существенно влияния на ростовую активность овса сорта Тоболяк в ювенильный период. Наиболее устойчивым к токсическому воздействию ионов алюминия на ранних этапах онтогенеза с концентрацией 4 и 9 ммоль/л в растворе был сорт Тоболяк – индекс длины корня семидневных проростков растений составил 57 и 20 % относительно контроля. Выявлено, что на варианте с максимальной концентрацией ионов

алюминия (15 ммоль/л) наибольшие значения индекса длины корня были у сорта Радужный (10 %). Наиболее сильный ингибирующий эффект при взаимодействии с ионами алюминия с концентрацией 4, 9 и 15 ммоль/л отмечался у сорта Отрада – ИДК достиг 7 % относительно контроля.

**Финансирование.** Работа выполнена за счет государственного задания № 124022900011-6 и при поддержке Западно-Сибирского межрегионального научно-образовательного центра мирового уровня.

### Библиографический список

1. Аканова Н. И. Эффективность известкования как фактор плодородия почв и охраны окружающей среды // *Плодородие*. 2023. № 3(132). С. 5–9. DOI: 10.25680/S19948603.2023.132.01
2. Гончар-Зайкин П. П., Чертов В. Г. Надстройка к EXCEL для статистической оценки и анализа результатов полевых и лабораторных опытов // *Рациональное природопользование и сельскохозяйственное производство в южных регионах Российской Федерации: сборник материалов научно-практической конференции «Разработка адаптивных систем природоохранных технологий производства сельскохозяйственной продукции в аридных районах России»*. М., 2003. С. 559–565.
3. Давыдова Н. В., Марченкова Л. А., Павлова О. В., Чавдарь Р. Ф., Орлова Т. Г., Широколава А. В. Адаптивность сортов и линий яровой пшеницы к искусственно создаваемым осмотическому, солевому и кислотному стресс-факторам на ранних этапах онтогенеза // *Биосфера*. 2022. Т. 14, № 4. С. 306–310.
4. Иванов А. Л., Столбовой В. С., Гребенников А. М., Оглезнев А. К., Петросян Р. Д., Шиллов 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
5. Иванова Ю. С., Фомина М. Н., Брагина М. В. Оценка технологических показателей коллекционных сортов овса в Тюменской области // *Аграрный вестник Урала*. 2023. Т. 23, № 10. С. 2–10. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-23-10-2-10
6. Косарева И. А., Блинова Е. В., Лоскутов И. Г. Овес: характеристика образцов по устойчивости к алюмотоксичности кислых почв // *СПб.: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова»*, 2021. 44 с. DOI: 10.30901/978-5-907145-77-1
7. Каюгина С. М., Еремин Д. И. Вариабельность физико-химических свойств темно-серых лесных почв Северного Зауралья // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2022. № 4(96). С. 13–18. DOI: 10.37670/2073-0853-2022-96-4-13-18
8. 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
9. Яковлева О. В., Капешинский А. М. Генетические основы устойчивости к токсичным ионам алюминия у разных видов злаков // *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2012. Т. 170, С. 45–57.
10. Vishnyakova M. A., Semenova E. V., Kosareva I. A., Kravchuk N. D., Loskutov C. I., Pukhalskii I. V., Shaposhnikov A. I., Sazanov A. L., Belimov A. A. Method for rapid assessment of aluminum tolerance of pea (*Pisum sativum* L.) // *Agricultural Biology*. 2015. Vol. 50, № 3. P. 353–360. DOI: 10.15389/agrobiology.2015.3.353rus
11. Loskutov I. G., Butris V., Kosareva I. A., Blinova E. V., Novikova YU L. 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, № 3. P. 96–110. DOI: 10.30901/2227-8834-2022-3-96-110
12. Huanhuan G., Sang Y., Jiayi W., Liuyan W., Ruili W., Wei L., Lijiao M., Fang Y., Qingyuan Z., Cui C. Genome-wide association analysis of aluminum tolerance related traits in rapeseed (*Brassica napus* L.) during germination // *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2020. Vol. 68, P. 335–357. DOI: 10.1007/s10722-020-00989-2

### References

1. Akanova, N. I. Effektivnost' izvestkovaniya, kak faktor plodorodiya pochv i okhrany okruzhayushchei sredy [Efficiency of liming as a factor of soil fertility and environmental protection] // *Plodorodie*. 2023. № 3(132). S. 5–9. DOI: 10.25680/S19948603.2023.132.01
2. Gonchar-Zaikin P. P., Chertov V. G. Nadstroika k EXCEL dlya statisticheskoi otsenki i analiza rezul'tatov polevykh i laboratornykh opytov [EXCEL add-on for statistical assessment and analysis of field and laboratory trials] // *Ratsional'noe prirodopol'zovanie i sel'skokhozyaistvennoe proizvodstvo v yuzhnykh regionakh Rossiiskoi Federatsii: sbornik materialov nauchno-prakticheskoi konferentsii «Razrabotka adaptivnykh sistem prirodookhrannykh tekhnologii proizvodstva sel'skokhozyaistvennoi produktsii v aridnykh raionakh Rossii»*. M., 2003. S. 559–565.
3. Davydova N. V., Marchenkova L. A., Pavlova O. V., Chavdar' R. F., Orlova T. G., Shirokolava A. V. Adaptivnost' sortov i linii yarovoi pshenitsy k iskusstvenno sozdavaemym osmoticheskomu, solevomu i kislotnomu stress-faktoram na rannikh etapakh ontogeneza [Adaptability of spring wheat varieties and lines to artificially created osmotic, salt and acid stress factors at early stages of ontogenesis] // *Biosfera*. 2022. T. 14, № 4. S. 306–310.
4. Ivanov A. L., Stolbovoi V. S., Grebennikov A. M., Ogleznev A. K., Petrosyan R. D., Shilov P. M. Ranzhirovanie kislykh pochv po prioritetnosti provedeniya izvestkovaniya v Rossiiskoi Federatsii [Ranking of acidic soils by priority of liming in the Russian Federation] // *Byulleten' Pochvennogo instituta im. V. V. Dokuchaeva*. 2020. № 103. S. 168–187. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-103-168-187

5. Ivanova Yu. S., Fomina M. N., Bragina M. V. Otsenka tekhnologicheskikh pokazatelei kollektsionnykh sortov ovsa v Tyumenskoj oblasti [Estimation of technological indicators of collection oat varieties in the Tyumen region] // Agrarnyi vestnik Urala. 2023. T. 23, № 10. S. 2–10. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-23-10-2-10
6. Kosareva I. A., Blinova E. V., Loskutov I. G. Oves: Kharakteristika obraztsov po ustoichivosti k alyumotoksichnosti kislykh pochv [Oats: Characteristics of samples according to resistance to aluminum toxicity of acidic soils]. SPb.: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe nauchnoe uchrezhdenie «Federal'nyi issledovatel'skii tsentr Vserossiiskii institut geneticheskikh resursov rastenii im. N. I. Vavilova», 2021. 44 s. DOI: 10.30901/978-5-907145-77-1
7. Kayugina S. M., Eremin D. I. Variabel'nost' fiziko-khimicheskikh svoystv temno-serykh lesnykh pochv Severnogo Zaural'ya [Variability of physical and chemical properties of dark gray forest soils of the Northern Trans-Urals] // Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2022. № 4(96). S. 13–18. DOI: 10.37670/2073-0853-2022-96-4-13-18
8. Shkurkin S. I., Nosikov V. V., Torshin S. P. Osnovopolozhnik kolloidnoi khimii pochv [The founder of colloidal chemistry of soils] // Plodorodie. 2022. № 2(125). S. 71–73. DOI: 10.25680/S19948603.2022.125.17
9. Yakovleva O. V., Kapeshinskii A. M. Geneticheskie osnovy ustoichivosti k toksichnym ionam alyuminiya u raznykh vidov zlakov [Genetic basis of resistance of different types of cereals to toxic aluminum ions] // Trudy po prikladnoi botanike, genetike i seleksii. 2012. T. 170, S. 45–57.
10. Vishnyakova M. A., Semenova E. V., Kosareva I. A., Kravchuk N. D., Loskutov C. I., Pukhalskii I. V., Shaposhnikov A. I., Sazanova A. L., Belimov A. A. Method for rapid assessment of aluminum tolerance of pea (*Pisum sativum* L.) // Agricultural Biology. 2015. Vol. 50, № 3. P. 353–360. DOI: 10.15389/agrobiology.2015.3.353rus
11. Loskutov I. G., Butris V., Kosareva I. A., Blinova E. V., Novikova YU L. 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, № 3. P. 96–110. DOI: 10.30901/2227-8834-2022-3-96-110
12. Huanhuan G., Sang Y., Jiayi W., Liuyan W., Ruili W., Wei L., Lijiao M., Fang Y., Qingyuan Z., Cui C. Genome-wide association analysis of aluminum tolerance related traits in rapeseed (*Brassica napus* L.) during germination // Genetic Resources and Crop Evolution. 2020. Vol. 68, P. 335–357. DOI: 10.1007/s10722-020-00989-2

Поступила: 24.03.25; доработана после рецензирования: 20.05.25; принята к публикации: 03.06.25.

**Критерии авторства.** Авторы статьи подтверждают, что имеют на статью равные права и несут равную ответственность за плагиат.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Авторский вклад.** Ахтямова А. А., Еремин Д. И. – постановка цели и задач, формирование методологии исследования и концепции статьи, анализ данных и их интерпретация, подготовка рукописи; Савельева Ю. В. – подготовка опыта, сбор данных.

**Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**