

## ФИТОТОКСИЧНАЯ И БИОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ОВСА ПОСЕВНОГО (*AVENA SATIVA* L.) ТЮМЕНСКОЙ СЕЛЕКЦИИ К ДЕЙСТВИЮ ИОНОВ АЛЮМИНИЯ

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

**А.В. Любимова**, кандидат биологических наук, заведующая лабораторией геномных исследований в растениеводстве, ostapenkoav88@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-1570-9595;

**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, РФ, Тюменская область, Тюменский район, п. Московский, ул. Бурлаки, д. 2.

Цель исследований – изучить фитотоксичное влияние возрастающей концентрации ионов алюминия на генотипы овса посевного (*Avena sativa* L.) в ювенильный период. Объектом испытаний были сорта овса, которые являются селекционным достижением НИИСХ СЗ – филиал ТюмНЦ СО РАН и имеют повсеместное распространение в сельском хозяйстве. Оценка фитотоксичности различных концентраций ионов алюминия проводили по методической рекомендации МР 2.1.7.2297-07 путём сопоставления показателей длины семидневных корешков контрольных и опытных образцов. Водные растворы для проращивания образцов овса готовили из сульфата алюминия ( $Al_2(SO_4)_3$ ) с концентрацией ионов алюминия 4, 9 и 15 моль/л. В качестве контроля использовали дистиллированную воду. В результате исследований выявлен наиболее устойчивый к токсическому воздействию ионов алюминия на ранних этапах онтогенеза с концентрацией 4 и 9 ммоль/л сорт Тобольск – фитотоксический эффект достиг 43 и 80% соответственно. Восприимчивым к стресс-фактору был сорт Отрада, который характеризовался сильным ингибирующим эффектом. Негативное влияние ионы алюминия оказали и на массу первичных корешков, что привело к её снижению на 72–80% относительно контроля (CV=7–12%). Индекс соотношения массы корней и побегов на контроле составлял 1, тогда как при стресс-факторе он снижался до 0,2–0,4 ед., что объясняется перераспределением питательных веществ в растениях в наземную массу независимо от генотипа овса. Для биохимической оценки выделяли геномную ДНК из семидневных coleoptiles и корешков растений овса, проросших в дистиллированной воде (контроль) и при концентрации ионов алюминия в растворе 15 ммоль/л. Далее проводили электрофорез в 1% агарозном геле, содержащем 10 мкл 1% бромистого этидия. При визуализации целостности ДНК coleoptiles контрастных генотипов при помощи Гель-документирующей системы GelDoc Go отклонений относительно контроля не наблюдалось. Тогда как при воздействии ионов алюминия на первичные корешки растений выявлена деградация ДНК, что может использоваться как маркер для ранней диагностики восприимчивых и устойчивых генотипов овса.

**Ключевые слова:** фитотоксичность, биохимическая оценка, овёс посевной (*Avena sativa* L.), ионы алюминия, аллюмоустойчивые генотипы, электрофорез, деградация ДНК.

**Для цитирования:** Ахтямова А.А., Любимова А.А., Савельева Ю.В. Фитотоксичная и биохимическая оценка овса посевного (*Avena sativa* L.) Тюменской селекции к действию ионов алюминия // Зерновое хозяйство России. 2026. Т. 18. №3. С. 30-35. DOI: 10.31367/2079-8725-2026-104-3-30-35.



## PHYTOTOXIC AND BIOCHEMICAL ESTIMATION OF OATS (*AVENA SATIVA* L.) OF TYUMEN BREEDING TO ALUMINUM IONS

**A.A. Akhtyamova**, Candidate of Agricultural Sciences, senior researcher of the laboratory for genomic researches in plant breeding, gen.i72@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0297-6958;

**A.V. Lyubimova**, Candidate of Biological Sciences, head of the laboratory for genomic researches in plant breeding, ostapenkoav88@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-1570-9595;

**Yu.V. Savelyeva**, junior researcher of the laboratory for genomic researches in plant breeding, savelyeva25@mail.ru, ORCID ID: 0009-0002-8445-3754.

SRIA for NTU – branch of FSI FRC TSC SB of RAS;  
625501, Russia, Tyumen region, Moskovsky, Burlaki Str., 2.

The purpose of the current work was to study the phytotoxic effects of increasing aluminum ion concentrations on oat genotypes (*Avena sativa* L.) during the juvenile stage. The objects of the study were the oat varieties which were a selection achievement of the SRIA for NTU – branch of TSC SB of RAS and are widely used in agriculture. The phytotoxicity of various aluminum ion concentrations was estimated according to methodological recommendation MR 2.1.7.2297-07 by comparing the seven-day root lengths of control and experimental samples. Aqueous solutions for oat germination were prepared from aluminum sulfate ( $Al_2(SO_4)_3$ ) with aluminum ion concentrations of 4, 9, and 15 mol/l. Distilled water

was used as a control. The current study has identified the variety Tobolyak as the most resistant to the toxic effects of aluminum ions at early stages of ontogenesis, with concentrations of 4 and 9 mmol/l, respectively. The variety Otrada was more sensitive to the stress factor, exhibiting a strong inhibitory effect. Aluminum ions also had a negative effect on primary rootlet mass, resulting in a 72–80% decrease relative to the control (CV = 7–12%). The root-to-shoot mass ratio in the control was 1, while under stress, it decreased to 0.2–0.4 units. This is explained by the redistribution of plant nutrients to the above-ground mass, regardless of oat genotype. For biochemical estimation there has been isolated a genomic DNA from seven-day-old coleoptiles and roots of oat plants germinated in distilled water (control) and at a concentration of 15 mmol aluminum ions per liter. Then there has been carried out an electrophoresis in a 1% agarose gel containing 10  $\mu$ L of 1% ethidium bromide. When visualizing the DNA integrity of coleoptiles of contrasting genotypes using the GelDoc Go gel documentation system, there was no deviations from the control. However, there has been established a DNA degradation at the exposure of primary plant roots to aluminum ions, which can be used as a marker for early detection of susceptible and resistant oat genotypes.

**Keywords:** phytotoxicity, biochemical estimation, oats (*Avena sativa* L.), aluminum ions, aluminum-resistant genotypes, electrophoresis, DNA degradation.

**Введение.** Возделывание сельскохозяйственной продукции сопровождается высокой антропогенной нагрузкой на почву, что в результате отражается на обменной кислотности. Активное применение минеральных удобрений приводит к высвобождению катионов водорода ( $H^+$ ) и алюминия ( $Al^{3+}$ ) из почвенно-поглощающего комплекса переходя в доступную форму для растений в связи с чем почвы сельскохозяйственного назначения становятся менее эффективными (Кластер и др., 2023). Территория пахотных угодий в Тюменской области по данным Росреестра составляет 1160,8 тыс. га из которых 72 % являются кислыми. Присутствие ионов алюминия в водорастворимой форме оказывает негативное влияние на рост и развитие растений. Под воздействием ионов алюминия происходит нарушение клеточного метаболизма корневой системы вызывая её деформацию (снижение длины и массы корешков, уменьшение количества корневых волосков), что влияет на эффективность обмена веществ и протекание физиологических и биохимических процессов в растениях (Loskutov et al., 2022; Ofое et al. 2023). Снижение эффективности поглощения питательных веществ растениями отрицательно влияет на урожайность и качество получаемой продукции.

Овес посевной (*Avena sativa* L.) относится к группе зернофуражных культур и обладает относительно высокой устойчивостью при возделывании на кислых почвах. Данная культура имеет широкое распространение в пищевой промышленности и особенно ценна в области диетического питания безглютеновых продуктов (Rodriguez et al., 2022). В области кормопроизводства овес возделывают не только для получения зерна, но и в качестве зеленого корма имеет широкое распространение благодаря своим полезным свойствам. Посевные площади овса в России по данным Росстата достигают 104,7 тыс. га, из которых 10% приходится на Тюменскую область. Овес является наименее требовательной культурой и обладает относительной устойчивостью к кислотности почвы, что позволяет размещать в севообороте замыкающее место. С учетом сложившихся обстоятельств активно ведутся исследования по созданию генотипов овса устойчивых к повышенной кислотности почв и токсическому проявлению ионов алюминия (Лоскутов и др., 2024).

Определение признаков толерантности к ионам алюминия на ранних стадиях развития растений позволяет оптимизировать селекционные процессы, направленные на создание новых сортов. Механизмы, отвечающие за адаптационную и регуляторную функцию

устойчивости растений к токсичному проявлению ионов алюминия, контролируется генетически. В связи с этим активно ведутся исследования по установлению маркеров позволяющих прогнозировать степень устойчивости и восприимчивости растений к ионам алюминия (Яковлева, 2025; Zuev et al., 2024).

Цель исследований – изучить влияние возрастающей концентрации ионов алюминия на генотипы овса посевного (*Avena sativa* L.) в ювенильный период.

**Материалы и методы исследований.** Фитотоксичную и биохимическую оценку влияния ионов алюминия на растения овса проводили в лаборатории геномных исследований в растениеводстве НИИСХ СЗ – филиал ТюмНЦ СО РАН в 2025 году. Объектом испытаний были 6 образцов овса посевного: Отрада, Фома, Талисман, Тоболяк, Сириус и Радужный. Указанные сорта являются селекционным достижением Института и имеют широкое распространение в Тюменской области (Любимова и др., 2022; Иванова и др., 2023).

Оценку фитотоксичности различных концентраций ионов алюминия проводили по методической рекомендации МР 2.1.7.2297-07 путём сопоставления показателей длины корня контрольных и опытных образцов (Русаков и др., 2008). Водные растворы для проращивания образцов овса готовили из сульфата алюминия ( $Al_2(SO_4)_3$ ) с концентрацией ионов алюминия 4, 9 и 15 моль/л. В качестве контроля использовали дистиллированную воду. Для создания благоприятных условий для прорастания зерна овса опытные образцы помещали в электрический сушевоздушный термостат ТС-1/80 СПУ при постоянной температуре 20 °С. По истечении 7-и дней инкубации был произведен замер длины наибольшего корня каждого проростка на всех вариантах и контроле. Величину эффекта торможения развития первичных корешков при воздействии возрастающей концентрации ионов алюминия определяли по формуле 1. Токсичное действие считалось доказанным, если фитозффект составлял более 20 %.

$$E_t = \frac{L_k - L_{on}}{L_k} \times 100\% \quad (1)$$

где:  $E_t$  – эффект торможения; %

$L_{on}$  – средняя длина корней в опыте, мм.

$L_k$  – средняя длина корней в контроле, мм.

Сухую массу корней и побегов растений овса определяли из 100 проросших зерен в четырехкратном

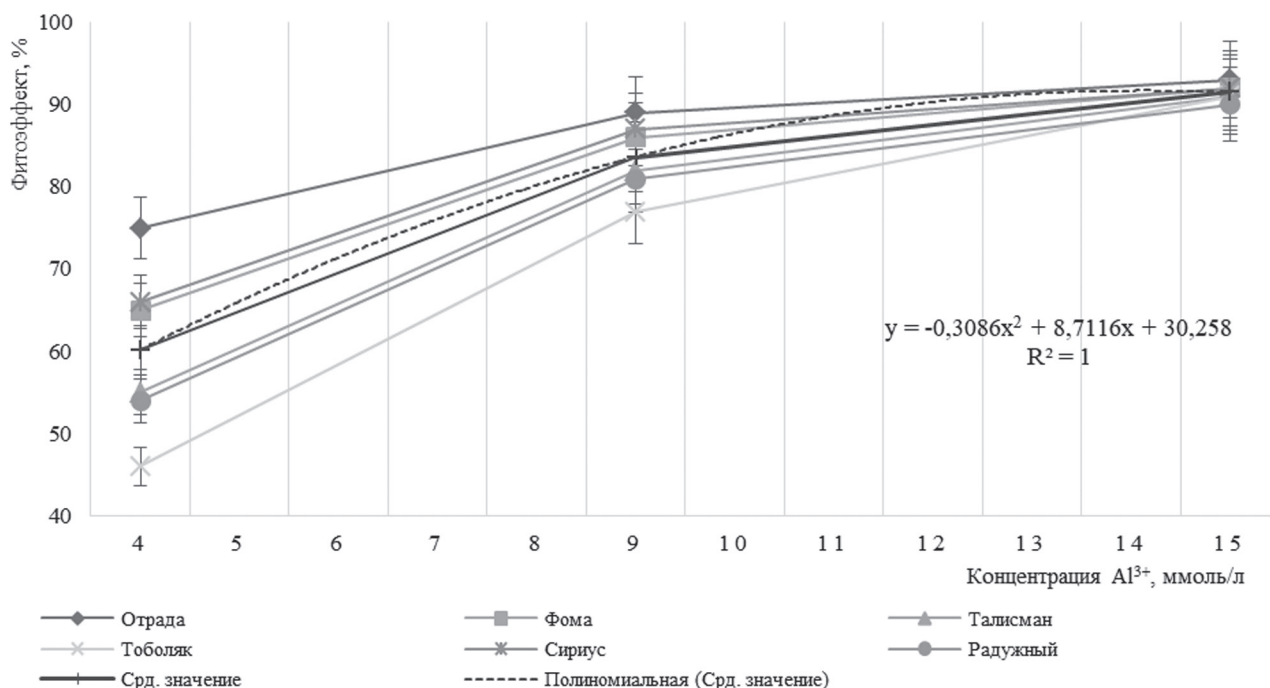
повторении. Растительный материал высушивали (100 °С) с последующим взвешиванием.

Для определения влияния высоких концентраций ионов алюминия на деградацию ДНК, выделяли геномную ДНК из семидневных coleoptiles и корешков растений овса, проросших в дистиллированной воде (контроль) и при концентрации ионов алюминия в растворе 15 ммоль/л. Использовали методику, описанную Н.В. Кононенко с соавторами (2019), с модификациями. Для анализа отбирали по 4 coleoptiles и кончики корешков (5–7 мм) одних и тех же растений. Растительный материал помещали в 2,0 мл пробирки Eppendorf, приливали 800 мкл экстракционного буфера (20 мл 1М Трис-HCl, 5 мл 5М NaCl, 5 мл 0,5М ЭДТА, 5 мл 10% SDS, деионизированная вода до 100 мл) и гомогенизировали тefлоновыми пестиками. Затем вносили 15 мкл Протеиназы-К, инкубировали 60 мин при 37 °С, центрифугировали и отбирали верхнюю фазу (700 мкл). Депротеинизацию проводили внесением равного объема смеси хлороформ-изоамиловый спирт (24:1). После центрифугирования образцов, отбирали водную фазу, вносили в нее 10 мкл РНКазы А и инкубировали 30 мин при 37 °С. После повторяли депротеинизацию смесью хлороформ-изоамилового спирта в течение 5 мин. Далее образцы центрифугировали, переносили водную фазу в новую пробирку и осаждали ДНК добавлением 600 мкл ледяного изопропанола. Образцы центрифугировали и

дважды промывали ДНК 70% этанолом. Полученный осадок ДНК растворяли в 100 мкл деионизированной воды. Оценку чистоты и количества ДНК образцов проводили путём измерения концентрации нуклеиновых кислот при помощи микроспектрофотометра Nano-500 (Allsheng, Китай) с определением соотношений A260/A280 и A260/A230 нм. Для оценки целостности выделенной ДНК проводили электрофорез в 1% агарозном геле, содержащем 10 мкл 1% бромистого этидия. Для этого 5 мкл образцов ДНК смешивали с 5 мкл 6х загрузочного буфера (ДиазМ). Электрофорез проводили в горизонтальных камерах (Mupid-EX, Япония) в трис-боратном буфере при постоянном напряжении 150 В течение 40 мин. Использовали маркеры молекулярного веса ДНК-Лэддер М-100 и ДНК-Лэддер М-1Кб (Диалат, Россия). После электрофореза ДНК визуализировали при помощи Гель-документирующей системы GelDoc Go (BioRad, Сингапур).

Математическую обработку данных и дисперсионный анализ проводили с использованием надстройки AgCStat для программного продукта Microsoft Excel.

**Результаты и их обсуждение.** Сортовая реакция овса на стресс, вызванный ионами алюминия, проявлялась при минимальной изучаемой концентрации. Наименее устойчивым оказался сорт Отрада, у которого фитотоксический эффект при 4 ммоль/л ионов алюминия составил 75% (рис. 1).



**Рис. 1.** Фототоксическая оценка влияния ионов алюминия на развитие первичных корешков относительно контроля при 5%- уровне погрешности, %

**Fig. 1.** Phototoxicity estimation of the effect of aluminum ions on primary root development relative to the control at a 5% level of error, %

Примечание.  $HCP_{05}$  по фактору A=3%;  $HCP_{05}$  по фактору B=3%;  $HCP_{05}$  по взаимодействию AB=4%, фактор A – сорт, фактор B – концентрация ионов алюминия.

Наиболее близкими к Отраде оказались сорта Фома и Сириус, фитоэффект которых был 65 и 66 % соответственно. Сорта Талисман и Радужный были более устойчивы к токсическому действию алюминия – фитоэффект составил 54–55%. Максимальной алюмоустойчивостью характеризовался сорт Тоболяк, у которого токсичное действие было минимальным – 43 %. Устойчивость этого генотипа прослеживается и при более высокой концентрации ионов алюминия (9 ммоль/л) – фитоэффект составил 80%, тогда как у Отрады и Фомы он достиг 86–89%. Сорта Талисман и Радужный не имели достоверных отличий между собой независимо от исследуемого варианта ( $F_{\text{факт}} < F_{\text{теор.}}$  при  $p=5\%$ ). Дальнейшее повышение концентрации ионов алюминия до 15 ммоль/л оказало тотальный негативный эффект на прорастание изучаемых сортов овса. Фитоэффект составил 90–93% независимо от изучаемых сортов. Это указывает на видовой порог устойчивости овса к токсическому действию алюминия.

В ходе исследований была установлена достоверная связь ( $R^2=1$ ) между возрастающей концентрацией ионов алюминия и токсичным действием на развитие семидневных корешков растений овса. Регрессионное

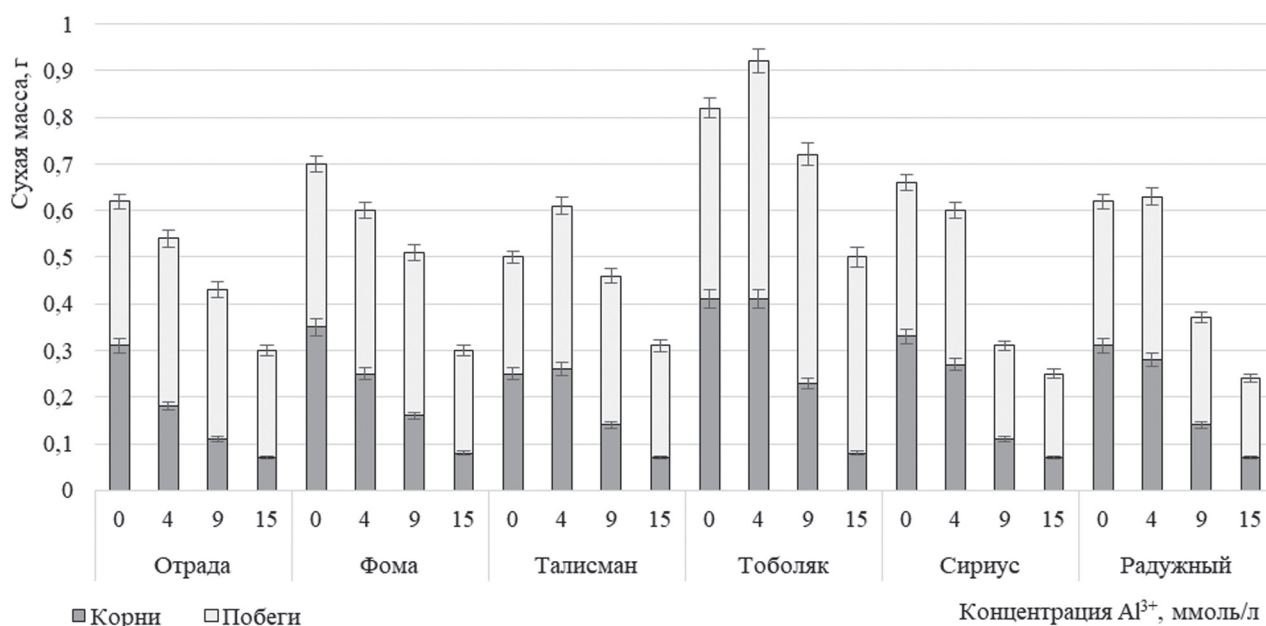
полиномиальное уравнение, достоверно в диапазоне содержания ионов алюминия в растворе от 4 до 15 ммоль/л. Уравнение соответствует следующему типу:

$$y = -0,3086x^2 + 8,7116x + 30,258 \quad (2)$$

где;  $y$  – фитоэффект, %;

$x$  – концентрация ионов алюминия в растворе, ммоль/л.

В связи с токсичным проявлением ионов алюминия на длину корней семидневных растений овса, была проведена оценка их влияния на массу корней и побегов. При стресс-факторе темпы роста и развития растений изменяются, подстраиваясь к условиям окружающей среды. Масса корней овса на контроле варьировала от 0,25 до 0,41 г – столь существенный разброс обусловлен сортовой особенностью (рис. 2). Вариабельность данного признака на контроле была слабой – CV находился в пределах 3–8%. Индекс соотношения массы корней и побегов (СКП) равнялся 1, что объясняется равномерным распределением питательных веществ в растениях.



**Рис. 2.** Сухая масса семидневных корней и побегов овса в зависимости от концентрации ионов алюминия при 5-ти % уровне погрешности, г

**Fig. 2.** Dry weight of seven-day-old oat roots and shoots depending on the concentration of aluminum ions at a 5% level of error, g

Проращивание растений овса на варианте с концентрацией ионов алюминия 4 ммоль/л не оказало существенного влияния на массу корней относительно контроля у сортов Талисман, Тоболяк и Радужный ( $F_{\text{факт.}} < F_{\text{теор.}}$  при  $p=5\%$ ). Тогда как у сортов Отрада, Фома и Сириус наблюдалось снижение массы корней на 10–42% относительно контроля (CV<10%). При концентрации  $Al^{3+}$  4 ммоль/л наблюдалось увеличение массы побегов на 11–35% относительно контроля у сортов Отрада, Талисман, Тоболяк и Радужный.

Увеличение концентрации  $Al^{3+}$  до 9 ммоль/л негативно отразилось на массе первичных корешков растений овса. Наименее чувствительными к стресс-фактору были сорта Талисман и Тоболяк – масса

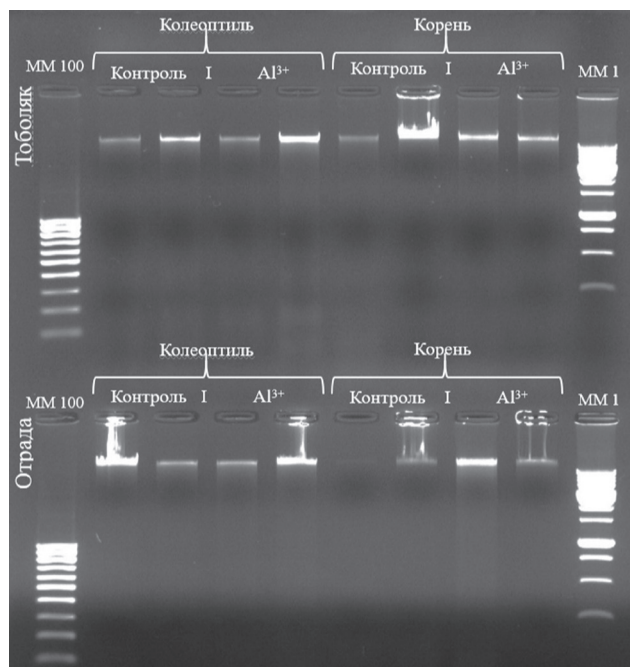
корней уменьшилась в 1,8 раза относительно контроля (CV 9 и 15% соответственно).

На варианте с максимальной концентрацией  $Al^{3+}$  наиболее чувствительными оказались первичные корешки, масса которых уменьшилась на 72–80% относительно контроля (CV=7–12%). Индекс соотношения корней и побегов составил 0,2–0,4 ед., что объясняется перераспределением питательных веществ в растениях независимо от сорта. Динамика изменения сухой массы корней и побегов генотипов овса имело умеренную положительную корреляционную связь (0,69) относительно возрастающей концентрации ионов алюминия в растворе.

С увеличением концентрации ионов алюминия в

растворе, используемом для прорастания растений овса, наблюдали деструкцию coleoptiles и деформацию первичных корешков. Поэтому была проведена оценка целостности ДНК coleoptiles и корешков овса электрофорезным методом, проросших на контроле (вода) и в растворе с концентрацией

ионов алюминия 15 ммоль/л. Для анализа были выбраны контрастные генотипы овса по устойчивости к токсичному действию ионов алюминия. По результатам анализа наиболее устойчивого сорта Тобольск не выявлено признаков деградации ДНК, полученной из coleoptiles и корней (рис. 3).



**Рис. 3.** Электрофорезные спектры ДНК сортов овса Тобольск и Отрада при воздействии ионов алюминия на раннем этапе онтогенеза

Обозначения: Маркеры молекулярного веса ДНК-Лэддер М-100 (100-1000 пар оснований) и ДНК-Лэддер М-1Кб (250-10000 пар оснований)

**Fig. 3.** Electrophoretic DNA spectra of the oat varieties Tobolsk and Otrada when affected by aluminum ions at an early stage of ontogenesis

Designations: molecular weight markers DNA-Ladder M-100 (100-1000 base pairs) and DNA-Ladder M-1Kb (250-10,000 base pairs)

При воздействии ионов алюминия на восприимчивый сорт Отрада происходила интенсивная деградация ДНК в корешках. Это вызвано тем, что основной мишенью токсичного проявления ионов алюминия были первичные корешки растений овса, что также отражалось на их длине и массе. В связи с этим ДНК корешков растений овса может являться маркером для оценки устойчивости генотипов к ионам алюминия.

**Выводы.** Наиболее устойчивым к токсическому воздействию ионов алюминия на ранних этапах онтогенеза с концентрацией 4 и 9 ммоль/л был сорт Тобольск – фитозффект достиг 43 и 80% соответственно. Восприимчивым к стресс-фактору был сорт Отрада,

который характеризовался сильным ингибирующим эффектом. Установлено, что основной мишенью ионов алюминия является снижение ростовых процессов семидневных корешков растений овса, которое отражается в фитозффекте и массе. Под действием ионов алюминия выявлена деградация ДНК в корешках растений овса, что также может использоваться как маркер для ранней диагностики восприимчивых и устойчивых генотипов овса.

**Финансирование.** Работа выполнена за счет государственного задания 124022900011-6 и при поддержке Западно-Сибирского межрегионального научно-образовательного центра мирового уровня.

#### Библиографический список

1. 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. EDN JLENNF
2. Кононенко Н. В., Диловарова Т. А., Канавский Р. В., Лебедев С. В., Баранова Е. Н., Федореева Л. И. Оценка морфологических и биохимических параметров устойчивости различных генотипов пшеницы к хлоридному засолению // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2019. Т. 14, № 1. С. 18-39. DOI: 10.22363/2312-797X-2019-14-1-18-39. EDN BABIAD
3. Клостер Н. И., Азаров В. Б., Лоткова В. В. Изменение кислотности чернозема типичного и формирование урожайности зерновых культур при биологической системе земледелия в условиях Центрально-черноземной зоны // Земледелие. 2023. № 5. С. 42-45. DOI: 10.24412/0044-3913-2023-5-42-45. EDN TGSEGX
4. Лоскутов И. Г., Блинова Е. В., Новикова Л. Ю. Изучение разнообразия алюмоустойчивости образцов овса из коллекции ВИР // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2024. Т. 185, № 1. С. 129-138. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-129-138. EDN CZZPYG
5. 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
6. 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 // Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. Москва. 2008. 15 с.

7. Яковлева О. В. Генетический контроль признака алюмоустойчивости у образцов ярового ячменя // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2025. Т. 186, № 1. С. 170-176. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-1-170-176. EDN PGAGWI
8. 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, No. 3. P. 96-110. DOI: 10.30901/2227-8834-2022-3-96-110. EDN WCLSLXA
9. Ofoe R. Thomas R. H., Asiedu S. K., Wang-Pruski G., Fofana B., Abbey L. Aluminum in plant: Benefits, toxicity and tolerance mechanisms // Front. Plant Sci. 2022. Vol. 13. DOI: 10.3389/fpls.2022.1085998
10. Rodriguez J.M., Estevez V., Bascunan K., Ayala J., Araya M. Commercial oats in gluten-free diet: A persistent risk for celiac patients// Sec. Nutritional Immunology. 2022. Vol. 9. DOI: 10.3389/fnut.2022.986282
11. Zuev E. V., Lebedeva T. V., Yakovleva O. V., Kolesova M. A., Brykova A. N., Lysenko N. S., Tyryshkin L. G. Genetic Diversity for Effective Resistance in Wheat Landraces from Ethiopia and Eritrea to Fungal Diseases and Toxic Aluminum Ions // Plants. 2024. Vol. 13, No. 8. DOI: 10.3390/plants13081166. EDN GMBLVY.

### References

1. Ivanova Yu. S., Fomina M. N., Bragina M. V. Otsenka tekhnologicheskikh pokazatelei kollektsionnykh sortov ovsa v Tyumenskoi oblasti [Estimation of the technological indicators of 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. EDN JLENNF
2. Kononenko N. V., Dilovarova T. A., Kanavskii R. V., Lebedev S. V., Baranova E. N., Fedoreeva L. I. Otsenka morfologicheskikh i biokhimicheskikh parametrov ustoychivosti razlichnykh genotipov pshenitsy k khloridnomu zasoleniyu [Estimation of morphological and biochemical parameters of chloride salinity resistance of various wheat genotypes] // Vestnik Rossiiskogo universiteta družby narodov. Seriya: Agronomiya i zhivotnovodstvo. 2019. T. 14, № 1. S. 18-39. DOI: 10.22363/2312-797X-2019-14-1-18-39. EDN BABIAD
3. Kloster N. I., Azarov V. B., Lotkova V. V. Izmenenie kislotsnosti chernozema tipichnogo i formirovanie urozhainosti zernovykh kul'tur pri biologicheskoi sisteme zemledeliya v usloviyakh Tsentral'no-chnoemnoi zony [Changes in typical blackearth acidity and development of grain crop productivity under a biological farming system in the Central Blackearth Zone]// Zemledelie. 2023. № 5. S. 42-45. DOI 10.24412/0044-3913-2023-5-42-45. EDN TGSEGX
4. Loskutov I. G., Blinova E. V., Novikova L. Yu. Izuchenie raznoobraziya alyumoustoychivosti obraztsov ovsa iz kollektsii VIR [The study of the diversity of aluminum resistance of oat samples from the VIR collection] // Trudy po prikladnoi botanike, genetike i selektsii. 2024. T. 185, № 1. S. 129-138. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-129-138. EDN CZZPYG
5. Lyubimova A. V., Eremin D. I., Kochneva D. A. Izmenenie pokazatelei geneticheskoi struktury populyatsii sortov ovsa, vozdel'yaemykh v Tyumenskoi oblasti, za 90-letnii period [Changes in the genetic structure of oat varieties cultivated in the Tyumen region over a 90-year period] // Vestnik KrasGAU. 2022. № 12(189). S. 32-41. DOI: 10.36718/1819-4036-2022-12-32-41. EDN JVDCCD
6. Rusakov N. V., Kryatov I. A., Pirtakhiya N. V., Tonkopii N. I., Kartseva N. Yu., Starodubov A. G. Obosnovanie klassa opasnosti otkhodov proizvodstva i potrebleniya po fitotoksichnosti: Metodicheskie rekomendatsii [Justification of the hazard class of production and consumption waste based on phytotoxicity: methodological recommendations] // Federal'nyi tsentr gigieny i epidemiologii Rospotrebnadzora. Moskva. 2008. 15 s.
7. Yakovleva O. V. Geneticheskii kontrol' priznaka alyumoustoychivosti u obraztsov yarovogo yachmenya [Genetic control of the aluminum resistance trait of spring barley samples]// Trudy po prikladnoi botanike, genetike i selektsii. 2025. T. 186, № 1. S. 170-176. DOI 10.30901/2227-8834-2025-1-170-176. EDN PGAGWI
8. 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, No. 3. P. 96-110. DOI: 10.30901/2227-8834-2022-3-96-110. EDN WCLSLXA
9. Ofoe R. Thomas R. H., Asiedu S. K., Wang-Pruski G., Fofana B., Abbey L. Aluminum in plant: Benefits, toxicity and tolerance mechanisms // Front. Plant Sci. 2022. Vol. 13. DOI: 10.3389/fpls.2022.1085998
10. Rodriguez J.M., Estevez V., Bascunan K., Ayala J., Araya M. Commercial oats in gluten-free diet: A persistent risk for celiac patients// Sec. Nutritional Immunology. 2022. Vol. 9. DOI 10.3389/fnut.2022.986282
11. Zuev E. V., Lebedeva T. V., Yakovleva O. V., Kolesova M. A., Brykova A. N., Lysenko N. S., Tyryshkin L. G. Genetic Diversity for Effective Resistance in Wheat Landraces from Ethiopia and Eritrea to Fungal Diseases and Toxic Aluminum Ions // Plants. 2024. Vol. 13, No. 8. DOI: 10.3390/plants13081166. EDN GMBLVY

Поступила: 01.10.25; доработана после рецензирования: 17.03.26; принята к публикации: 30.04.26.

**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., Любимова А.В. – постановка цели и задач, формирование методологии исследования и концепции статьи, анализ данных и их интерпретация, подготовка рукописи; Савельева Ю.В. – подготовка опыта, сбор данных, оформление введения.

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