

Система селекции и семеноводства / Plant Breeding and Seed Production

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1391](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1391)

EDN: [CETDHA](https://edn.ru/CETDHA)

УДК 633.112.1



Микроморфологические изменения овса посевного (*Avena sativa* L.) в ювенильный период при токсическом воздействии ионов алюминия

А.А. Ахтямова

Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северного Зауралья – филиал Федерального исследовательского центра Тюменского научного центра Сибирского отделения РАН, Московский, Тюменская обл., Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. В России на долю кислых почв пахотного фонда приходится около 30% площади, основная часть которой сосредоточена в лесостепной и подтаежной зоне. Кислотность почв является одной из важных абиотических стресс-факторов для полноценного роста и развития растений. В кислых почвах гидроокись алюминия преобразуется в подвижные ионы, которые оказывают негативное влияние на рост и развитие растений на протяжении всей вегетации. При воздействии ионов алюминия на растения овса нарушается деление клеток кортекса, что приводит к деформации корневой системы (уменьшается длина корня, изменяется цвет, увеличивается толщина). Вызванные трансформации приводят к снижению эффективности поглощения питательных веществ корневой системой растений овса и как следствие происходит снижение урожайности и ухудшение качества зерна.

Цель – изучить влияние ионов алюминия на ростовую активность овса посевного на раннем этапе онтогенеза.

Материалы и методы. Исследования проводили в лаборатории геномных исследований в растениеводстве НИИСХ СЗ – филиал ТюмНЦ СО РАН в 2024 году. Объектом исследований влияния ионов алюминия на ростовую активность в первые 7 дней жизни были 20 сортов овса посевного (*Avena sativa* L.). Генотипы овса проращивали рулонным методом по ГОСТу 12038-85 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести». Варианты опыта для проращивания растений овса предусматривали: дистиллированную воду (контроль); растворы

с концентрацией ионов алюминия: 4, 9 и 15 ммоль/л. В качестве источника ионов алюминия была выбрана его сульфатная производная ($Al_2(SO_4)_3$). Изучено воздействие стресса на клетки генотипов овса в корневом чехлике, под действием возрастающей концентрации ионов алюминия. Оценку на наличие крахмальных зерен в корневом чехлике генотипов овса проводили при помощи светового микроскопа Optika B-500Trp1 в 400 кратном увеличении. Для окрашивания крахмальных зерен использовали 1% раствор йода в молочной кислоте. Статистическую обработку данных и дисперсионный анализ проводили с использованием программ AgCStat и Statistica для программного продукта Microsoft Excel.

Результаты. Проращивание генотипов овса в растворах с концентрацией ионов алюминия 4 ммоль/л на 7 сутки оказало негативное влияние на развитие корневой системы – индекс длины корня (ИДК) достиг 27-65 % относительно контроля. Наиболее устойчивыми к воздействию стресс-фактора с концентрацией Al^{3+} 4 ммоль/л были генотипы Гунтер (к-14957), Бербер (к-15689) и Сапсан (к-15444) – ИДК составил 64-65 % относительно контроля.

Среди изученных генотипов овса выявлена группа восприимчивых сортов к воздействию возрастающей концентрации ионов алюминия (4-15 ммоль/л): Фауст (к-14781), 207h12 (к-15809), 325h12 (к-15808) и Червонный (к-2896). Среднее значение ИДК у восприимчивой группы достигло: 4 ммоль/л – 35; 9 ммоль/л – 17%; 15 ммоль/л – 9% относительно контроля. По результатам двухфакторного дисперсионного анализа установлено влияние ионов алюминия на развитие длины первичных корешков (93%) и соотношение воздушно-сухой массы корней и побегов (65%) генотипов овса ($F_{факт.} > F_{теор.}$). Восприимчивые генотипы овса к стресс-фактору имели признаки деструкции крахмальных зерен в корневом чехлике при концентрации Al^{3+} 9 ммоль/л. Эти изменения связаны со структурным нарушением клеток в корневом чехлике, что в результате приводит к утрате геотропической чувствительности растений.

Заключение. В результате проведенных исследований выявлены толерантные генотипы овса к воздействию возрастающей концентрации ионов алюминия (4-15 ммоль/л) в ювенильный период: Бербер (к-15924), 162h15 (к-15925), Аргамак (к-14648) и Сапсан (к-15444). Среднее значение индекса длины корня, наиболее устойчивых генотипов овса, на вариантах с возрастающей концентрацией ионов алюминия достигло: 4 ммоль/л – 62; 9 ммоль/л – 32%; 15 ммоль/л – 13% относительно контроля. Основной мишенью токсического проявления ионов алюминия на растения овса были первичные корешки. Под действием стресс-фактора индекс соотношения корней и побегов генотипов овса уменьшился в 1,5-3,8 раза относительно контрольных значений. Установлена взаимосвязь устойчивости генотипов овса к ионам алюминия с наличием крахмальных зерен в корневом чехлике.

Ключевые слова: овёс посевной; *Avena sativa* L.; ионы алюминия; стресс-фактор; ростовая активность; алюмоустойчивость; кислотность почв; корневой чехлик; крахмальные зерна

Для цитирования. Ахтямова, А. А. (2026). Микроморфологические изменения овса посевного (*Avena sativa* L.) в ювенильный период при токсическом воздействии ионов алюминия. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 244–261. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1391>

Micromorphological changes in oats (*Avena sativa* L.) in the juvenile period under toxic exposure to aluminum ions

A.A. Akhtyamova

Research Agricultural Institute of the Northern Trans-Urals, branch of the Federal Research Center of Tyumen Scientific Center, Siberian branch, Russian Academy of Sciences, Moskovskii, Tyumen Region, Russian Federation

Abstract

Background. In Russia, acidic soils account for about 30% of the arable land area, the bulk of which is concentrated in the forest-steppe and subtaiga zones. Soil acidity is one of the important abiotic stress factors for the full growth and development of plants. In acidic soils, aluminum hydroxide is converted into mobile ions, which have a negative impact on the growth and development of plants throughout the growing season. When oat plants are exposed to aluminum ions, cell division in the cortex is disrupted, which leads to deformation of the root system (the length of the root decreases, the color changes, the thickness increases). The resulting transformations lead to a decrease in the efficiency of nutrient absorption by the root system of oat plants, and as a consequence, there is a decrease in yield and deterioration in grain quality.

The **purpose** to study the effect of aluminum ions on the growth activity of oats at an early stage of ontogenesis.

Materials and methods. The studies were conducted in the laboratory of genomic research in plant growing Research Agricultural Institute of the Northern Trans-Urals, branch of the Federal Research Center of Tyumen Scientific Center, Siberian branch, Russian Academy of Sciences in 2024. The object of research into the effect of aluminum ions on growth activity in the first 7 days of life were 20 varieties of oats (*Avena sativa* L.). Oat genotypes were germinated using the roll method according to GOST 12038-85 “Seeds of agricultural crops. Methods for determining germination”. The experimental variants for germinating oat plants included: distilled water (control); solutions with aluminum ion concentrations of 4, 9 and 15 mmol/l. The sulfate derivative of aluminum ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) was chosen as a source

of aluminum ions. The effect of stress on cells of oat genotypes in the root cap was studied under the influence of increasing concentration of aluminum ions. The presence of starch grains in the root cap of oat genotypes was assessed using an Optika B-500Tpl light microscope at 400x magnification. To stain starch grains, a 1% solution of iodine in lactic acid was used. Statistical data processing and variance analysis were performed using the AgCStat and Statistica programs for the Microsoft Excel software product.

Results. Germination of oat genotypes in solutions with an aluminum ion concentration of 4 mmol/l on the 7th day had a negative impact on the development of the root system - the root length index (RLI) reached 27-65% relative to the control. The most resistant to the impact of the stress factor with an Al^{3+} concentration of 4 mmol/l were the genotypes Gunter (k-14957), Berber (k-15689) and Sapsan (k-15444) – the RLI was 64-65% relative to the control. Among the studied oat genotypes, a group of varieties susceptible to the effects of increasing concentrations of aluminum ions (4-15 mmol/l) was identified: Faust (k-14781), 207h12 (k-15809), 325h12 (k-15808), and Chervonny (k-2896). The average value of the RLI in the susceptible group reached: 4 mmol/l – 35; 9 mmol/l – 17%; 15 mmol/l – 9% relative to the control. According to the results of a two-factor analysis of variance, the influence of aluminum ions on the development of the length of primary roots (93%) and the ratio of air-dry mass of roots and shoots (65%) of oat genotypes was established ($F_{fact.} > F_{theor.}$). Oat genotypes susceptible to the stress factor showed signs of destruction of starch grains in the root cap at an Al^{3+} concentration of 9 mmol/l. These changes are associated with structural disruption of cells in the root cap, which ultimately leads to a loss of geotropic sensitivity in plants.

Conclusion. As a result of the conducted studies, tolerant oat genotypes to the effects of increasing concentrations of aluminum ions (4-15 mmol/l) during the juvenile period were identified: Berber (k-15924), 162h15 (k-15925), Argamak (k-14648) and Sapsan (k-15444). The average value of the root length index of the most resistant oat genotypes in variants with increasing concentration of aluminum ions reached: 4 mmol/l – 62; 9 mmol/l – 32%; 15 mmol/l – 13% relative to the control. The main target of the toxic effects of aluminum ions on oat plants were primary roots. Under the influence of the stress factor, the index of the ratio of roots and shoots of oat genotypes decreased by 1.5-3.8 times relative to the control values. A relationship has been established between the resistance of oat genotypes to aluminum ions and the presence of starch grains in the root cap.

Keywords: oats; *Avena sativa* L.; aluminum ions; stress factor; growth activity; aluminum resistance; soil acidity; root cap; starch grains

For citation. Akhtyamova, A. A. (2026). Micromorphological changes in oats (*Avena sativa* L.) in the juvenile period under toxic exposure to aluminum ions. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 244–261. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1391>

Введение

Овёс посевной (*Avena sativa* L.) – это злаковое однолетнее травянистое растение, которое широко распространено в кормовой и пищевой сфере сельского хозяйства по всему миру [6; 14; 15]. В 2024 году по данным Росстата посевные площади овса в Российской Федерации составили 1,7 млн. га. В условиях высокой антропогенной нагрузки популяризации овса способствовала генетически заложенная устойчивость на эдафический стресс и неприхотливость к почвенному плодородию.

Одним из важных абиотических стресс-факторов для растений является кислотность почв, которая сопровождается алюмотоксичностью. В кислых почвах гидроокись алюминия преобразуется в подвижные ионы, которые оказывают влияние на рост и развитие растений на протяжении всей вегетации [17]. Наиболее активная подвижность ионов алюминия проявляется на кислых почвах с $\text{pH} < 5,0$ [20–21]. При продолжительном взаимодействии растений с ионами алюминия происходит нарушение клеточного метаболизма, что приводит к деформации корневой системы [16; 22; 23]. Вызванные трансформации приводят к снижению эффективности поглощения питательных веществ корневой системой растений. В результате происходит не только снижение урожайности, но и ухудшение качества зерна.

На долю кислых почв пахотного фонда России приходится около 30% площади, основная часть которой сосредоточена в лесостепной и подтаежной зоне [11]. Это крайне важно для определения стратегии агропромышленного комплекса страны, поскольку получение высоких урожаев сельскохозяйственных культур ограничивается не только кислотностью почв, но и климатическими особенностями.

С переходом на качественно новый уровень селекции сельскохозяйственных культур, в том числе зерновых, появилась возможность создания новых сортов, обладающих генетической устойчивостью к неблагоприятным абиотическим факторам [9; 10]. В связи с этим приоритетным исследованием становится поиск генетических форм, обладающих устойчивостью к токсическому действию алюминия с целью их вовлечения в селекционный процесс. Как показали исследования многих ученых, первичный скрининг генотипов зерновых культур на выявление чувствительных и устойчивых к высокому содержанию ионов алюминия в почвенном растворе можно проводить на ранних этапах онтогенеза растения [1; 18].

Цель исследования – изучить влияние ионов алюминия на ростовую активность генотипов овса на раннем этапе онтогенеза.

Материалы и методы

Изучение реакции овса на различные концентрации ионов алюминия проводили в лаборатории геномных исследований в растениеводстве НИ-ИСХ СЗ – филиал ТюмНЦ СО РАН в 2024 году. Исследования основаны на способности семян овса посевного (*Avena sativa* L.) реагировать на изменение концентрации ионов алюминия в растворе при прорастивании. Ранее А.Г. Баталовой с соавторами было установлено, что овёс обладает эдафической устойчивостью на протяжении всей вегетации и способен прорасти при повышенном содержании ионов алюминия и других солей [3].

Схема опыта была представлена в следующем виде: Контроль (дистиллированная вода); растворы для прорастивания зерна с возрастающей концентрацией ионов алюминия: 4, 9 и 15 ммоль/литр. В качестве источника ионов алюминия была выбрана его сульфатная производная ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$).

Объектом исследований были 20 сортов овса посевного (*Avena sativa* L.): Аватар (к-15443), 25h18 (к-15926), Скороспелый (к-11717), Гунтер (к-14957), 178h13 (к-15924), 94h18 (к-15928), Бербер (к-15689), 162h15 (к-15925), Аргмак (к-14648), Сапсан (к-15444), Эклипс (к-15187), Медведь (к-15494), Кречет (к-14857), Дэнс (к-14782), Фаленец (к-15851), Санур (к-15616), Фауст (к-14781), 207h12 (к-15809), 325h12 (к-15808) и Червонный (к-2896), которые являются селекционным достижением Кировской селекционной станции [4; 7].

Исследования проводили по ГОСТу 12038-85 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести». На лист увлажнённой соответствующим раствором фильтровальной бумаги раскладывали семена овса зародышами вниз по линии, проведённой на расстоянии 3 см от верхнего края листа. Сверху семена накрывали увлажненным листом бумаги, затем неплотно сворачивали в рулон и помещали в вертикальном положении в ёмкость с раствором. Генотипы овса для прорастания размещали в электрическом суховоздушном термостате ТС-1/80 СПУ при температуре 20 °С. По истечении 7-и дней у проростков был произведен замер длины наибольшего корня каждого растения на всех вариантах и контроле. Расчет индекса длины корня проводили по формуле 1.

$$\text{ИДК} = \frac{L_{\text{оп}}}{L_{\text{к}}} \times 100\% \quad (1)$$

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

Реакцию на окрашивание крахмальных зерен в корневом чехлике опытных образцов проводили при помощи световой микроскопии в 400 кратном увеличении. Для окрашивания крахмальных зерен использовали 1%

раствор йода в молочной кислоте [2]. Срезанные кончики корешков помещали в йодный раствор на 10 мин. По истечении времени корешки просматривали в микроскоп и фотографировали.

Математическую обработку данных и дисперсионный анализ проводили с использованием программ AgCStat и Statistica для программного продукта Microsoft Excel [8].

Результаты

В присутствии ионов алюминия в растворе корни растений изменяются, замедляется их рост, корешки укорачиваются и становятся толще, что в результате отражается на росте и развитии. Поэтому произведя расчёт индекса длины корня (ИДК) относительно контрольных значений 20 генотипов овса, выращенных в растворах с концентрацией ионов алюминия 4, 9 и 15 ммоль/л, позволило реализовать кластерный анализ по методу Варда (рис. 1). В результате кластеризации изучаемые генотипы разделились поровну на две группы с расстоянием 116 единиц. Во второй кластер (К II) вошли 10 генотипов овса значения ИДК на варианте с концентрацией Al^{3+} 4 ммоль/л составили 36-49 % относительно контроля (табл. 1).

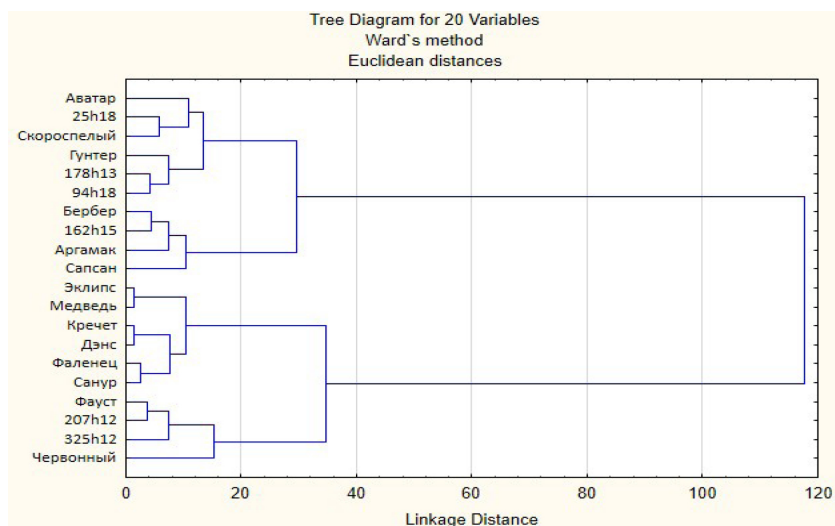


Рис. 1. Результаты кластеризации индекса длины корня генотипов овса при различных концентрациях ионов алюминия в растворе

Fig. 1. Results of clustering the root length index of oat genotypes at various concentrations of aluminum ions in solution

Значения ИДК образцов проросших на растворах с концентрацией Al^{3+} 4 ммоль/л, которые относятся к первому кластеру (К I) были в 1,4 раза выше К II и составили 50...65 % относительно контроля. Наиболее устойчивыми к стресс-фактору в К I и отделившейся на 30 единиц в данной группе были сорта: Бербер (к-15689), 162h15 (к-15925), Аргамак (к-14648) и Сапсан (к-15444). При повышении концентрации ионов алюминия в растворе до 9 ммоль/л сохраняется та же тенденция по алюмоустойчивости у данной группы ($F_{факт.} > F_{теор.}$).

Таблица 1.

Индекс длины корня генотипов овса в зависимости от возрастающей концентрации ионов алюминия в растворе, % относительно контроля

Table 1. Root length index of oat genotypes as a function of increasing aluminum ion concentration in the solution, % relative to the control

№ п/п	Сорт (номер по каталогу ВИР) (фактор А)	Концентрация Al^{3+} в растворе, ммоль/л (фактор В)		
		4	9	15
1	Аватар (к-15443)	57	16	10
2	25h18 (к-15926)	54	22	14
3	Скороспелый (к-11717)	50	25	11
4	Гунтер (к-14957)	64	23	10
5	178h13 (к-15924)	58	27	11
6	94h18 (к-15928)	58	23	10
7	Бербер (к-15689)	65	29	10
8	162h15 (к-15925)	60	31	10
9	Аргамак (к-14648)	59	31	15
10	Сапсан (к-15444)	65	37	15
11	Эклипс (к-15187)	45	22	12
12	Медведь (к-15494)	46	22	13
13	Кречет (к-14857)	44	19	10
14	Дэнс (к-14782)	44	18	10
15	Фаленец (к-15851)	49	17	10
16	Санур (к-15616)	47	16	11
17	Фауст (к-14781)	36	15	9
18	207h12 (к-15809)	39	17	10
19	325h12 (к-15808)	36	22	10
20	Червонный (к-2896)	27	12	8
Среднее в группе, n=20		50	22	11

HCP_{05} по фактору А=2,2 %; HCP_{05} по фактору В=1,6 %; HCP_{05} по взаимодействию АВ=1,9 %

На варианте с максимальной концентрацией ионов алюминия (15 ммоль/л) значения ИДК опытных образцов снижаются до 8-15 % относительно контроля. Наиболее устойчивые к токсическому проявлению ионов алюминия были сорта Аргамак (к-14648) и Сапсан (к-15444).

Двухфакторный дисперсионный анализ показал, что доля влияния фактора «генотип» овса на значения индекса длины корня относительно контроля составляет 2 % (табл. 2). В то время как доля влияния возрастающей концентрации ионов алюминия в растворе на ростовую активность корешков овса в ювенильный период достигает 93%.

Таблица 2.

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа индекса длины корня генотипов овса при различной концентрации Al^{3+} в растворе

Table 2. Results of a two-way analysis of variance for the root length index of oat genotypes at different concentrations of Al^{3+} in solution

Источник вариации	$F_{\text{факт}}$	$F_{\text{теор}}$	Влияние, %
Сорт	14	1,7	2
Концентрация Al^{3+} в растворе	3727	2,6	93
Взаимодействие	7	1,4	3

Также одним из важных показателей при оценке устойчивости растений к стрессу является соотношение массы корней и побегов [19]. В нормальных условиях масса побегов превышает массу корней – это обусловлено характером перераспределения пластических веществ для формирования и активного роста надземной части. В зависимости от стресс-фактора темпы роста и развития растений изменяются, подстраиваясь к условиям окружающей среды. Соотношение массы корней и побегов (СКП) у семидневных генотипов овса, проросших на контроле (дистиллированная вода), варьировало от 0,3 до 1,5 ед (табл. 3). Такой диапазон обусловлен сортовыми особенностями овса. Прорастивание растений на варианте с концентрацией ионов алюминия 4 ммоль/л привело к увеличению индекса СКП на 0,2-0,3 ед. относительно контроля у сортов: Эклипс, Медведь и Кречет. Это обусловлено тем, что в присутствии ионов алюминия рост длины корней замедляется, но при этом значения массы корней увеличиваются относительно контроля за счет их утолщения. Под действием ионов алюминия у сорта 325h12 (к-15808) индекс СКП уменьшился в 2 раза относительно контроля и составил 0,7 – это обусловлено снижением массы корней, что характеризует данный сорт как неустойчивый. Остальные изучаемые генотипы овса имели незначительные колебания индекса СКП на варианте с концентрацией Al^{3+} в растворе 4 ммоль/л.

Таблица 3.

Соотношение корней и проростков генотипов овса в зависимости от возрастающей концентрации ионов алюминия в растворе
Table 3. Ratio of roots to shoots in oat genotypes as a function of increasing aluminum ion concentration in the solution

№ п/п	Сорт (номер по каталогу ВИР) (фактор А)	Концентрация Al^{3+} в растворе, ммоль/л (фактор В)			
		Контроль	4	9	15
1	Аватар (к-15443)	0,7	0,6	0,3	0,3
2	25h18 (к-15926)	0,6	0,7	0,5	0,3
3	Скороспелый (к-11717)	0,6	0,7	0,5	0,2
4	Гунтер (к-14957)	0,7	0,7	0,5	0,2
5	178h13 (к-15924)	0,8	0,8	0,6	0,3
6	94h18 (к-15928)	0,6	0,7	0,5	0,3
7	Бербер (к-15689)	0,6	0,7	0,5	0,2
8	162h15 (к-15925)	0,7	0,7	0,5	0,2
9	Армак (к-14648)	0,6	0,7	0,6	0,4
10	Сапсан (к-15444)	0,6	0,7	0,6	0,3
11	Эклипс (к-15187)	0,5	0,7	0,5	0,3
12	Медведь (к-15494)	0,7	0,9	0,5	0,4
13	Кречет (к-14857)	0,3	0,6	0,5	0,3
14	Дэнс (к-14782)	0,6	0,6	0,4	0,2
15	Фаленец (к-15851)	0,6	0,6	0,4	0,2
16	Санур (к-15616)	0,5	0,5	0,3	0,2
17	Фауст (к-14781)	0,7	0,7	0,4	0,2
18	207h12 (к-15809)	0,7	0,7	0,5	0,3
19	325h12 (к-15808)	1,5	0,7	0,6	0,3
20	Червонный (к-2896)	0,7	0,6	0,4	0,2
Среднее в группе, n=20		0,7	0,7	0,5	0,3
HCP_{05} по фактору А=0,04; HCP_{05} по фактору В=0,03; HCP_{05} по взаимодействию АВ=0,03					

Дальнейшее повышение концентрации ионов алюминия в растворе приводило к постепенному снижению индекса СКП за счет уменьшения массы корней и проростков генотипов овса, достигнув 0,2-0,4 ед. В результате двухфакторного дисперсионного анализа, было установлено, что доля влияния изучаемых генотипов овса на индекс соотношения корней и побегов составляет 15 % (табл. 4). Тогда как доля влияния ионов алюминия с концентрацией 4-15 моль/л в растворе на индекс СКП в первые семь дней жизни растений достигает 65 %.

Таблица 4.

**Результаты двухфакторного дисперсионного анализа
соотношения массы корней и проростков генотипов овса при различной
концентрации Al^{3+} в растворе**

Table 4. Results of a two-factor analysis of variance for the ratio of root to shoot mass
in oat genotypes at different concentrations of Al^{3+} in solution

Источник вариации	$F_{\text{факт}}$	$F_{\text{теор}}$	Влияние, %
Сорт	25313	1,7	15
Концентрация Al^{3+} в растворе	663753	2,6	65
Взаимодействие	10541	1,4	20

В связи с визуальным изменением корешков растений овса под действием токсичных ионов алюминия была проведена реакция на наличие крахмальных зерен в корневом чехлике при помощи йодного раствора. В работе Н.В. Кононенко с коллегами при тестировании ячменя к токсическому действию ионов алюминия было установлено, что основной мишенью являются дифференцированные клетки корневого чехлика [12].

В этой части корешков расположена зона роста и деления клеток, а также крахмальные зерна, которые отвечают за гравитропическую направленность роста корней [5, 13]. Проведя тестирование йодным раствором 20 генотипов овса на контроле наблюдали интенсивное окрашивание крахмальных зерен.

Сорта овса, которые по показателю ИДК вошли в первый кластер на высоких концентрациях Al^{3+} (9 ммоль/л) в корневом чехлике наблюдали локализацию крахмальных зерен. На рисунке 2 представлены серии фотографий генотипов овса 162h25 (к-15925) и Сапсан (к-15444), на которых прослеживается динамика интенсивности окрашивания крахмальных зерен в зависимости от увеличения концентрации Al^{3+} в растворе.

Генотипы овса, которые по показателю ИДК входили во второй кластер, имели признаки деструкции крахмальных зерен. Например у сортов Червонный (к-2896) и 207h12 (к-15809) при концентрации ионов алюминия 9 ммоль/л крахмальные зерна не обнаруживаются. Эти изменения связаны со структурным нарушением клеток в корневом чехлике под действием токсичных ионов алюминия, что в результате приводит к утрате геотропической чувствительности и как следствие к угнетению развития корневой системы генотипов овса.

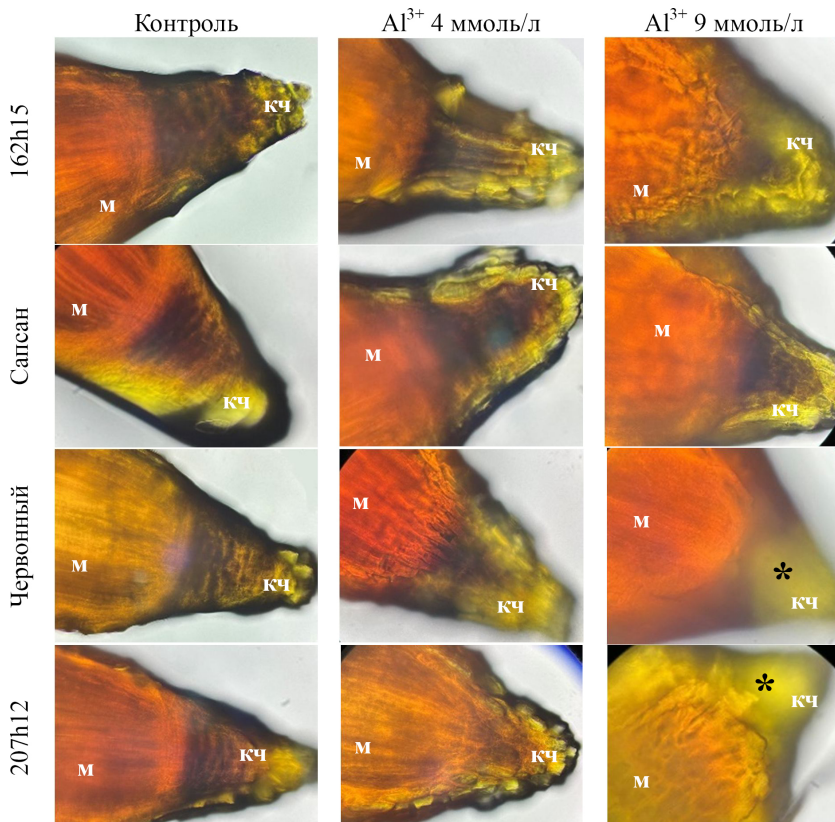


Рис. 2. Окрашенные корешки генотипов овса 1% раствором йода. Обозначения: м – меристема; кч – корневой чехлик; * - отсутствие крахмальных зерен.

Fig. 2. Oat genotype roots stained with a 1% iodine solution

Legend: m – meristem; rc – root cap; * – absence of starch grains.

Заключение

Ионы алюминия оказывают существенное влияние в первые семь дней жизни на рост и развитие генотипов овса. В результате проведенных исследований 20 генотипов овса были выявлены наиболее устойчивые к воздействию ионов алюминия (4-15 ммоль/л) сорта: Бербер (к-15924), 162h15 (к-15925), Аргмак (к-14648) и Сапсан (к-15444). Среднее значение индекса длины корня на вариантах с возрастающей концентрацией ионов алюминия достигло: 4 ммоль/л – 62%; 9 ммоль/л – 32%; 15 ммоль/л –

13% относительно контроля. Среди изученных генотипов овса выявлена группа восприимчивых сортов к воздействию ионов алюминия: Фауст (к-14781), 207h12 (к-15809), 325h12 (к-15808) и Червонный (к-2896). Среднее значение ИДК у восприимчивой группы достигло: 4 ммоль/л – 35; 9 ммоль/л – 17%; 15 ммоль/л – 9% относительно контроля. По результатам двухфакторного дисперсионного анализа установлено влияние ионов алюминия на развитие длины первичных корешков (93%) и соотношение воздушно-сухой массы корней и побегов (65%) генотипов овса ($F_{\text{факт.}} > F_{\text{теор.}}$). Основной мишенью токсического проявления ионов алюминия на растение овса были первичные корешки. Под действием стресс-фактора индекс СКП изучаемых генотипов овса уменьшился в 1,5-3,8 раза относительно контрольных значений. Выявлено, что генотипы овса имеют непосредственную связь устойчивости к ионам алюминия с наличием крахмальных зерен в корневом чехлике, которые отвечают за гравитропическую направленность роста растений.

Информация о конфликте интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-76-00048.

Благодарности. Автор статьи выражает благодарности А.В. Любимовой кандидату биологических наук, заведующей лабораторией и Д.И. Еремину доктору биологических наук, ведущему научному сотруднику НИИСХ СЗ – филиал ТюмНЦ СО РАН.

Список литературы

1. Асеева, Т. А., Зенкина, К. В., & Трифунтова, И. Б. (2021). Оценка зерновых яровых культур на устойчивость к алюминию. *Достижения науки и техники АПК*, 35(4), 35–40. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2021-10405>. EDN: <https://elibrary.ru/POIKYW>
2. Барыкина, И. П., Веселова, Т. Д., & Девятков, А. Г. (2004). *Справочник по ботанической микротехнике. Основы и методы* [Учебное пособие]. Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова. ISBN: 5-211-06103-9. EDN: <https://elibrary.ru/RBBHDP>
3. Баталова, Г. А., Широких, И. Г., Тулякова, М. В., и др. (2015). Некоторые результаты и вопросы методологии селекции овса на устойчивость к эдафическому стрессу. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*, (47)(4), 9–15. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2015.44.4.09-15>. EDN: <https://elibrary.ru/UCBQWX>

4. Баталова, Г. А., Тулякова, М. В., Пермякова, С. В., и др. (2014). Новые адаптивные сорта пленчатого овса. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*, (41)(4), 4–8. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2014.41.4.04-08>. EDN: <https://elibrary.ru/SGWETP>
5. Бабенко, Л. М., Щербатюк, Н. Н., Климчук, Д. А., и др. (2018). Структурно-функциональные особенности клеток мезофила листьев контрастных по термоустойчивости сортов *TRITICUM AESTIVUM* при действии кратковременных температурных стрессов. *Цитология*, 60(2), 128–135. <https://doi.org/10.31116/tsitol.2018.02.08>. EDN: <https://elibrary.ru/NRQINH>
6. Воложанина, Е. Н. (2025). Кормовая продуктивность и адаптивные свойства плёнчатых и голозёрных генотипов овса в условиях Кировской области. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*, 26(2), 239–250. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.2.239-250>. EDN: <https://elibrary.ru/EKDKOO>
7. Воложанина, Е. Н., & Баталова, Г. А. (2023). Оценка адаптивности ярового пленчатого овса по урожайности и качеству зерна в условиях Кировской области. *Российская сельскохозяйственная наука*, (4), 8–12. <https://doi.org/10.31857/S2500262723040026>. EDN: <https://elibrary.ru/JXAKVR>
8. Гончар-Зайкин, П. П., & Чертов, В. Г. (2003). Надстройка к EXCEL для статистической оценки и анализа результатов полевых и лабораторных опытов. В *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»* (с. 559–565). Москва.
9. Еремин, Д. И., Любимова, А. В., & Ахтямова, А. А. (2023). Элементы структуры урожайности как способ выявления засухоустойчивости современных сортов овса. *Достижения науки и техники АПК*, 37(7), 50–57. https://doi.org/10.53859/02352451_2023_37_7_50. EDN: <https://elibrary.ru/MYBXXF>
10. Заикина, Е. А., Румянцев, С. Д., Сарварова, Е. Р., и др. (2019). Гены транскрипционных факторов, задействованных в ответе растений на абиотические стрессовые факторы. *Экологическая генетика*, 17(3), 47–58. <https://doi.org/10.17816/ecogen17347-58>. EDN: <https://elibrary.ru/IUIILV>
11. Каюгина, С. М., & Еремин, Д. И. (2022). Физико-химические свойства серых лесных почв восточной окраины Зауральского Плато. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология*, 15(4), 471–490. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0399>. EDN: <https://elibrary.ru/YOCLPO>
12. Кононенко, Н. В., Чабан, И. А., Смирнова, Е. А., и др. (2019). Тестирование устойчивости разных форм ячменя (*Hordeum vulgare* L.) к токсическому дей-

- ствию алюминия. *Теоретическая и прикладная экология*, (2), 121–130. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-2-121-130>. EDN: <https://elibrary.ru/LGPVFJ>
13. Кривобок, А. С., & Бибикова, Т. Н. (2019). Регуляция роста и пространственной ориентации боковых корней *Arabidopsis thaliana* L. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*, (3), 80–94. <https://doi.org/10.34677/0021-342X-2019-3-80-94>. EDN: <https://elibrary.ru/UDOPLG>
14. Фомина, М. Н., Иванова, Ю. С., Брагин, Н. А., и др. (2024). Кормовая продуктивность и энергетическая питательность селекционных образцов овса посевного (*Avena sativa* L.) в условиях Северного Зауралья. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*, 185(2), 116–127. <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-2-116-127>. EDN: <https://elibrary.ru/ISJLVL>
15. Фомина, М. Н. (2015). Яровой овёс Фома. *Достижения науки и техники АПК*, 29(10), 63–66. EDN: <https://elibrary.ru/UMKOET>
16. Широких, И. Г., Назарова, Я. И., Огородникова, С. Ю., и др. (2020). Трансформация табака по гену синтеза глицинбетаина не ослабила чувствительность растений к токсичности алюминия в кислой почве. *Теоретическая и прикладная экология*, (2), 103–110. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-2-103-110>. EDN: <https://elibrary.ru/VQMKSA>
17. Шкуркин, С. И., Носиков, В. В., & Торшин, С. П. (2022). Основоположник коллоидной химии почв. *Плодородие*, (125)(2), 71–73. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2022.125.17>. EDN: <https://elibrary.ru/TPZPJT>
18. Щенникова, И. Н., & Шуплецова, О. Н. (2019). Источники для селекции ячменя устойчивого к токсичности алюминия. *Теоретические и прикладные проблемы агропромышленного комплекса*, (39)(1), 22–25. <https://doi.org/10.32935/2221-7312-2019-39-1-22-25>. EDN: <https://elibrary.ru/QOOAXA>
19. Bláha, L. (2019). Importance of root-shoot ratio for crops production. *J Agron Agri Sci*, 2, 012. <https://doi.org/10.24966/AAS-8292/100012>
20. Lin-Tong, Y., Yi-Ping, Q., Huan-Xin, J., & Li-Song, C. (2013). Roles of organic acid anion secretion in aluminium tolerance of higher plants. *BioMed Research International*, 2013, 16. <https://doi.org/10.1155/2013/173682>
21. Huanhuan, G., Sang, Y., Jiayi, W., Liuyan, W., Ruili, W., Wei, L., Lijiao, M., Fang, Y., Qingyuan, Z., & Cui, C. (2020). Genome-wide association analysis of aluminum tolerance related traits in rapeseed (*Brassica napus* L.) during germination. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 68, 335–357. <https://doi.org/10.1007/s10722-020-00989-2>. EDN: <https://elibrary.ru/DFVVFQ>
22. Muyuan, Y. Z., Jianwe, P., Lilin, W., Qing, G., & Chunyuan, H. (2003). Mutation induced enhancement of Al tolerance in barley cell lines. *Plant Science*, 164, 17–23. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(02\)00317-5](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00317-5). EDN: <https://elibrary.ru/BBTJTP>

23. Loskutov, I. G., Butris, V., Kosareva, I. A., Blinova, E. V., & Yu, L. Novikova. (2022). 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*, 183(3), 96–110. <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2022-3-96-110>. EDN: <https://elibrary.ru/WCLSXA>

References

1. Aseeva, T. A., Zenkina, K. V., & Trifuntova, I. B. (2021). Assessment of spring grain crops for aluminum resistance. *Dostizheniya Nauki i Tekhniki APK*, 35(4), 35–40. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2021-10405>. EDN: <https://elibrary.ru/POIKYW>
2. Barykina, I. P., Veselova, T. D., & Devyatov, A. G. (2004). *Handbook on botanical microtechnique: Fundamentals and methods* [Educational manual]. Lomonosov Moscow State University. ISBN: 5-211-06103-9. EDN: <https://elibrary.ru/RBBHDP>
3. Batalova, G. A., Shirokikh, I. G., Tulyakova, M. V., et al. (2015). Some results and methodological issues in oat breeding for resistance to edaphic stress. *Agrarnaya Nauka Evro-Severo-Vostoka*, 47(4), 9–15. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2015.44.4.09-15>. EDN: <https://elibrary.ru/UCBQWX>
4. Batalova, G. A., Tulyakova, M. V., Permyakova, S. V., et al. (2014). New adaptive varieties of hulled oats. *Agrarnaya Nauka Evro-Severo-Vostoka*, 41(4), 4–8. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2014.41.4.04-08>. EDN: <https://elibrary.ru/SGWETP>
5. Babenko, L. M., Shcherbatyuk, N. N., Klimchuk, D. A., et al. (2018). Structural and functional features of mesophyll cells in leaves of *Triticum aestivum* varieties contrasting in thermotolerance under short-term temperature stresses. *Tsitologiya*, 60(2), 128–135. <https://doi.org/10.31116/tsitol.2018.02.08>. EDN: <https://elibrary.ru/NRQINH>
6. Vologzhanina, E. N. (2025). Feed productivity and adaptive traits of hulled and naked oat genotypes in the Kirov region. *Agrarnaya Nauka Evro-Severo-Vostoka*, 26(2), 239–250. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.2.239-250>. EDN: <https://elibrary.ru/EKDKOO>
7. Vologzhanina, E. N., & Batalova, G. A. (2023). Assessment of adaptability of spring hulled oats by yield and grain quality in the Kirov region. *Rossiyskaya Sel'skokhozyaystvennaya Nauka*, (4), 8–12. <https://doi.org/10.31857/S2500262723040026>. EDN: <https://elibrary.ru/JXAKVR>
8. Gonchar-Zaikin, P. P., & Chertov, V. G. (2003). An add-in for EXCEL for statistical evaluation and analysis of field and laboratory experiment results. In *Rational nature management and agricultural production in the southern regions of the Russian Federation: Proceedings of the scientific and practical conference "Development of adaptive systems of environmental protection technologies for agricultural production in arid regions of Russia"* (pp. 559–565). Moscow.

9. Eremin, D. I., Lyubimova, A. V., & Akhtyamova, A. A. (2023). Elements of yield structure as a method for identifying drought tolerance in modern oat varieties. *Dostizheniya Nauki i Tekhniki APK*, 37(7), 50–57. https://doi.org/10.53859/02352451_2023_37_7_50. EDN: <https://elibrary.ru/MYBXXF>
10. Zaikina, E. A., Rumyantsev, S. D., Sarvarova, E. R., et al. (2019). Genes of transcription factors involved in the plant response to abiotic stress factors. *Ekologicheskaya Genetika*, 17(3), 47–58. <https://doi.org/10.17816/ecogen17347-58>. EDN: <https://elibrary.ru/IUIILV>
11. Kayugina, S. M., & Eremin, D. I. (2022). Physicochemical properties of gray forest soils in the eastern margin of the Trans-Ural Plateau. *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 15(4), 471–490. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0399>. EDN: <https://elibrary.ru/YOCLPO>
12. Kononenko, N. V., Chaban, I. A., Smirnova, E. A., et al. (2019). Testing the resistance of different barley (*Hordeum vulgare* L.) forms to the toxic effect of aluminum. *Teoreticheskaya i Prikladnaya Ekologiya*, (2), 121–130. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-2-121-130>. EDN: <https://elibrary.ru/LGPVFJ>
13. Krivobok, A. S., & Bibikova, T. N. (2019). Regulation of growth and spatial orientation of lateral roots in *Arabidopsis thaliana* L. *Izvestiya Timiryazevskoy Sel'skokhozyaystvennoy Akademii*, (3), 80–94. <https://doi.org/10.34677/0021-342X-2019-3-80-94>. EDN: <https://elibrary.ru/UDOPLG>
14. Fomina, M. N., Ivanova, Yu. S., Bragin, N. A., et al. (2024). Feed productivity and energy value of breeding samples of common oat (*Avena sativa* L.) in the conditions of Northern Trans-Urals. *Trudy po Prikladnoy Botanike, Genetike i Selektzii*, 185(2), 116–127. <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-2-116-127>. EDN: <https://elibrary.ru/ISJLVL>
15. Fomina, M. N. (2015). Spring oat 'Foma'. *Dostizheniya Nauki i Tekhniki APK*, 29(10), 63–66. EDN: <https://elibrary.ru/UMKOET>
16. Shirokikh, I. G., Nazarova, Ya. I., Ogorodnikova, S. Yu., et al. (2020). Transformation of tobacco with the glycine betaine synthesis gene did not reduce plant sensitivity to aluminum toxicity in acidic soil. *Teoreticheskaya i Prikladnaya Ekologiya*, (2), 103–110. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-2-103-110>. EDN: <https://elibrary.ru/VQMKSA>
17. Shkurkin, S. I., Nosikov, V. V., & Torshin, S. P. (2022). The founder of soil colloid chemistry. *Plodorodie*, 125(2), 71–73. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2022.125.17>. EDN: <https://elibrary.ru/TPZPJT>
18. Shchennikova, I. N., & Shupletsova, O. N. (2019). Sources for breeding aluminum-tolerant barley. *Theoretical and Applied Problems of the Agro-Industrial Complex*, 39(1), 22–25. <https://doi.org/10.32935/2221-7312-2019-39-1-22-25>. EDN: <https://elibrary.ru/QOOAXA>
19. Bláha, L. (2019). Importance of root-shoot ratio for crops production. *J Agron Agri Sci*, 2, 012. <https://doi.org/10.24966/AAS-8292/100012>

20. Lin-Tong, Y., Yi-Ping, Q., Huan-Xin, J., & Li-Song, C. (2013). Roles of organic acid anion secretion in aluminium tolerance of higher plants. *BioMed Research International*, 2013, 16. <https://doi.org/10.1155/2013/173682>
21. Huanhuan, G., Sang, Y., Jiayi, W., Liuyan, W., Ruili, W., Wei, L., Lijiao, M., Fang, Y., Qingyuan, Z., & Cui, C. (2020). Genome-wide association analysis of aluminum tolerance related traits in rapeseed (*Brassica napus* L.) during germination. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 68, 335–357. <https://doi.org/10.1007/s10722-020-00989-2>. EDN: <https://elibrary.ru/DFVVFQ>
22. Muyuan, Y. Z., Jianwe, P., Lilin, W., Qing, G., & Chunyuan, H. (2003). Mutation induced enhancement of Al tolerance in barley cell lines. *Plant Science*, 164, 17–23. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(02\)00317-5](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00317-5). EDN: <https://elibrary.ru/BBTJTP>
23. Loskutov, I. G., Butris, V., Kosareva, I. A., Blinova, E. V., & Yu, L. Novikova. (2022). 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*, 183(3), 96–110. <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2022-3-96-110>. EDN: <https://elibrary.ru/WCLSXA>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРЕ

Ахтямова Анастасия Андреевна, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.

Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северного Зауралья – филиал Федерального исследовательского центра Тюменского научного центра Сибирского отделения РАН
ул. Бурлаки, 2, пос. Московский, Тюменский р-н, Тюменская обл., 625501, Российская Федерация
gen.i72@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Anastasia A. Akhtyamova, Ph.D. Agricultural Sciences, Senior Researcher

Research Agricultural Institute of the Northern Trans-Urals, branch of the Federal Research Center of Tyumen Scientific Center, Siberian branch, Russian Academy of Sciences
2, Burlaki Str, Moskovskii, Tyumen Region, 625501, Russian Federation
gen.i72@mail.ru
SPIN-code: 6197-9642
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0297-6958>
Scopus Author ID: 58520030500

Поступила 16.06.2025

После рецензирования 19.07.2025

Принята 05.08.2025

Received 16.06.2025

Revised 19.07.2025

Accepted 05.08.2025