



## СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ

### AGRICULTURE

УДК 631.421.2

DOI 10.30914/2411-9687-2023-9-2-131-138

#### ВЛИЯНИЕ СОЛЕЙ СВИНЦА НА МОРФОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДОННИКА БЕЛОГО (*MELILOTUS ALBUS* MEDIK.)

**Е. А. Алябышева**

*Марийский государственный университет, г. Йошкар-Ола, Российская Федерация*

**Аннотация. Введение.** Проблема загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами становится все более актуальной. Ионы свинца из почвы тяжелые металлы поступают в растения и нарушают нормальное протекание морфологических и биохимических процессов. Видоспецифические механизмы поглощения свинца изучены недостаточно полно. **Цель исследования:** изучение влияния солей свинца на морфофизиологические параметры донника белого (*Melilotus albus* Medik.). **Материалы и методы.** Объектом исследования были семена и проростки донника белого (*Melilotus albus* Medik., сем. *Leguminosae* (*Fabaceae*)). Изучали влияние водных растворов  $Pb(NO_3)_2$  (0,001 М, 0,005 М, 0,01 М, 0,05 М, 0,1 М) на энергию прорастания и всхожести семян, проницаемость клеточных мембран и размеры корней и листьев проростков донника белого. **Результаты исследований и обсуждение.** С увеличением концентрации свинца в водном растворе (от 0,001 М до 0,1 М) энергия прорастания и всхожесть семян *Melilotus albus* существенно снижались по сравнению с контролем (на 19,0–94,3 % и 35,4–91,4 % соответственно), а вымываемость внутриклеточных электролитов из тканей главного корня и листьев увеличивалась в 2,7–3,0 и 1,6–2,4 раза соответственно. В условиях повышающегося загрязнения среды свинцом происходило уменьшение в 1,1–2,1 раза длины корней и в 1,1–1,3 раза высоты побегов проростков, что, по-видимому, связано с накоплением металла в растительных тканях, и, как следствие, торможение активности меристем. **Заключение.** 0,01–0,1 М растворы  $Pb(NO_3)_2$  оказывали токсическое процессы на прорастание семян, на состояние клеточных мембран, нарушая их липидный комплекс; свинец, поступив в ткани проростков донника белого, ингибировал рост главного корня и листьев.

**Ключевые слова:** загрязнение почвы, тяжелые металлы, ионы свинца, донник белый, энергия прорастания семян, всхожесть семян, проницаемость клеточных мембран

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Алябышева Е. А. Влияние солей свинца на морфофизиологические показатели донника белого (*Melilotus albus* Medik.) // Вестник Марийского государственного университета. Серия «Сельскохозяйственные науки. Экономические науки». 2023. Т. 9. № 2. С. 131–138. DOI: <https://doi.org/10.30914/2411-9687-2023-9-2-131-138>

#### THE EFFECT OF LEAD SALTS ON MORPHOPHYSIOLOGICAL PARAMETERS OF THE WHITE SWEET CLOVER (*MELILOTUS ALBUS* MEDIK.)

**E. A. Alyabysheva**

*Mari State University, Yoshkar-Ola, Russian Federation*

**Abstract. Introduction.** The problem of environmental pollution by heavy metals is becoming more and more urgent. Lead ions from the soil enter plants and disrupt the normal course of morphological and biochemical

processes. The species-specific mechanisms of lead absorption have not been fully studied. **The purpose of the research** is to study the effect of lead salts on the morphophysiological parameters of the white sweet clover (*Melilotus albus* Medik.). **Materials and methods.** The objects of the study were seeds and seedlings of white sweet clover (*Melilotus albus* Medik., *Leguminosae* (*Fabaceae*) family). The effect of aqueous solutions of  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  (0.001 M, 0.005 M, 0.01 M, 0.05 M, 0.1 M) on the energy of germination and viability of seeds, the permeability of cell membranes and the size of roots and leaves of white sweet clover (*Melilotus albus* Medik.) seedlings was studied. **Results, discussion.** With an increase in the concentration of lead in an aqueous solution (from 0.001 M to 0.1 M), the germination energy and viability of white sweet clover seeds significantly decreased compared to the control (by 19.0–94.3 % and 35.4–91.4 %, respectively), and the leachability of intracellular electrolytes from root and leaf tissues increased by 2.7–3.0 and 1.6–2.4 times, respectively. Under conditions of increasing lead pollution, there was a 1.1–2.1-fold decrease in the length of the roots and 1.1–1.3-fold decrease in the height of the shoots of seedlings, which, apparently, is associated with the accumulation of metal in plant tissues, and as a consequence, inhibition of meristem activity. **Conclusion.** 0.01–0.1 M solutions of  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  had a toxic effect on seed germination processes, on the state of cell membranes, disrupting their lipid complex; lead, entering the tissues of white sweet clover (*Melilotus albus*) seedlings, inhibited the growth of the main root and leaves.

**Keywords:** soil pollution, heavy metals, lead ions, white sweet clover, seed germination energy, seed viability, cell membrane permeability

The author declares no conflict of interest.

**For citation:** Alyabysheva E. A. The effect of lead salts on morphophysiological parameters of the white sweet clover (*Melilotus albus* Medik.). *Vestnik of the Mari State University. Chapter "Agriculture. Economics"*, 2023, vol. 9, no. 2, pp. 131–138. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30914/2411-9687-2023-9-2-131-138>

## Введение

В настоящее время проблема загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами становится все более актуальной [9, с. 582–591]. Тяжелые металлы из воздуха попадают в почву путем осаждения с атмосферными осадками и в виде сухих выпадений. Из почвы тяжелые металлы поступают в растения, нарушая нормальное протекание биохимических реакций. Избыточные концентрации тяжелых металлов отрицательно влияют на синтез и функции многих биохимически активных соединений: ферментов, витаминов, пигментов [3, с. 66–71; 4, с. 114–147; 6, с. 189–196; 7, с. 366–369].

Свинец не относится к необходимым питательным элементам. Многие растения аккумулируют свинец в концентрациях, во много раз превышающих концентрацию металла в почве. Способность растений накапливать тяжелые металлы и быть устойчивыми к их избытку является отражением их индивидуальных особенностей [1; 2, с. 22–26; 5, с. 16–23; 8, с. 71–80; 11, с. 103–179; 12, с. 54–61; 13, с. 125–136].

Свинец поступает в растения главным образом через корневую систему из почвы. На поверхности корня свинец связывается с карбоксильными группами уроновых кислот слизи.

Способность слизи связывать тяжелые металлы зависит от природы катиона следующим образом:  $\text{Pb}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Zn}^{2+}$ . Связывание со слизью ограничивает поступление металлов в корень и может быть важным компонентом барьерной функции корневой системы при их поступлении в растение. Часть связанных металлов может высвобождаться после биodeградации слизи [9, с. 635–640].

Рост корня более чувствителен к тяжелым металлам, чем рост побега, это коррелирует с преимущественным накоплением тяжелых металлов в корнях. M. Wierzbicka и D. Antosewicz [14, с. 351–423] определили зависимость между содержанием Pb в корнях и степенью ингибирования роста корней проростков ячменя (*Hordeum vulgare* L.) и кукурузы (*Zea mays* L.). Расчеты показали, что ингибирование роста корней ячменя начиналось при содержании примерно 525 мг Pb/кг сухой массы; 10 % торможение роста корня кукурузы, соответственно, при 183 мг/кг сухой массы. Низкие концентрации свинца могут стимулировать рост корневой системы.

В меньшей степени свинец может поступать в растения через листья, причем способность листьев поглощать металл зависит от их анатомических особенностей: чем сильнее опушенность

листьев, тем более интенсивно поступают через них металлы при загрязнении атмосферы. В разных органах растений содержание металла уменьшается в следующем порядке: корни > листья > побеги > соцветия > семена, хотя этот порядок для разных видов может несколько различаться<sup>1</sup> [2, с. 22–26; 10, с. 582–591].

Таким образом, специфические механизмы поглощения свинца, благодаря которым может различаться способность разных видов накапливать этот металл, описаны недостаточно полно.

**Целью** данного исследования было изучение влияния солей свинца на морфофизиологические параметры донника белого (*Melilotus albus* Medik.).

### Материалы и методы

В работе оценивали влияние различных концентраций  $Pb(NO_3)_2$  на морфофизиологические параметры донника белого (*Melilotus albus* Medik.) – двулетнее, реже однолетнее травянистое стержнекорневое растение семейства Бобовые *Leguminosae* (*Fabaceae*).

Варианты опыта: 1 – контроль (дистиллированная вода); 2 – 0,01 М  $Pb(NO_3)_2$ ; 3 – 0,05 М  $Pb(NO_3)_2$ ; 4 – 0,1 М  $Pb(NO_3)_2$ .

В ходе работы определяли изменение энергии прорастания и всхожести семян по ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести<sup>2</sup>. У семидневных проростков *M. albus* анализировали изменение размеров наземных и подземных органов (см). Определение проницаемости клеточных мембран корней и листьев проростков проводили кондуктометрическим методом (кондуктометр типа Анион 4120 со стальным электродом, мСм/см, погрешность  $\pm 2\%$ ). О проницаемости клеточных мембран судили по величине электропроводности водных вытяжек, которая зависела от количества электролитов в диффузиантах растительных тканей. Определение проводили в пяти биологических повторностях. Результаты ис-

<sup>1</sup> Бганцова М. В. Использование горчицы сарептской и райграса пастбищного для фиторемедиации загрязненных свинцом почв: дис. ... канд. биол. наук: 06.01.03. М., 2011. 116 с. URL: <https://www.dissercat.com/content/ispolzovanie-gorchitsy-sareptskoj-i-raigrasa-pastbishchnogo-dlya-fitoremiediatsii-zagryaznenn> (дата обращения 10.03.2023).

<sup>2</sup> ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. URL: [https://allgosts.ru/65/020/gost\\_12038-84](https://allgosts.ru/65/020/gost_12038-84) (дата обращения 26.02.2023).

следований обработаны статистически при помощи программы «Statistica 6.0», сравнение выборок проводили при помощи t-критерия Стьюдента, в работе принят уровень значимости  $P < 0,05$ .

### Результаты исследований и обсуждение

На примере многих растений было показано, что семена устойчивы к действию тяжелых металлов, что может быть результатом непроницаемости покровов семян для ионов металлов [6, с. 189–191]. Однако были обнаружены виды, например, горох посевной (*Pisum sativum* L.), у которых семенная кожура обладала хорошей проницаемостью для ионов свинца. Семена данного вида теряли способность прорасти под воздействием солей свинца [9, с. 635–640; 11, с. 582–591].

В ходе работы была прослежена скорость прорастания семян донника белого на растворах с разной концентрацией нитрата свинца. Так, в контроле в течение всего срока наблюдения было отмечено максимальное количество проросших семян: 24 часа – 22%; 48 часов – 79,6%; 72 часов – 84,0%; 96 часов – 88,8%; 120 часов – 95,2%; 240 часов – 97,0%. С повышением концентрации свинца в растворе было отмечено снижение энергии прорастания. Так, при концентрации 0,01 М  $Pb(NO_3)_2$  количество проросших семян снижалось в 1,5–7,8 раза, при 0,05 М  $Pb(NO_3)_2$  – в 2,0–55,0 раза меньше, чем в контроле. При этом ингибирующее действие 0,05 М и 0,01 М  $Pb(NO_3)_2$  проявлялось в большей степени на начальных этапах прорастания семян (24–72 часа). Концентрация 0,1 М  $Pb(NO_3)_2$  оказывала ярко выраженное токсическое действие на семена донника белого. Так, в течение 48 часов ни одного семени не проросло, на 10-е сутки с момента посева проросло лишь 5,4% семян, а в последующее время энергия прорастания при этой концентрации металла была минимальной (рис. 1).

Нитрат свинца снижал и всхожесть семян донника белого: 0,01 М  $Pb(NO_3)_2$  – в 1,6 раза; 0,05 М  $Pb(NO_3)_2$  – в 2,0 раза; 0,1 М  $Pb(NO_3)_2$  – в 17,9 раз (рис. 2).

Изучив влияние растворов нитрата свинца разной концентрации на энергию прорастания и всхожесть семян *Melilotus albus*, мы обнаружили, что все варианты статистически значимо отличаются от контроля ( $P < 0,05$ ). Концентрация нитрата свинца даже в 0,01 М уже ингибирует

прорастание семян донника белого. Ингибирование процессов прорастания семян в присутствии

металла связано, вероятно, с торможением процессов деления и растяжения клеток [3, с. 66–71].

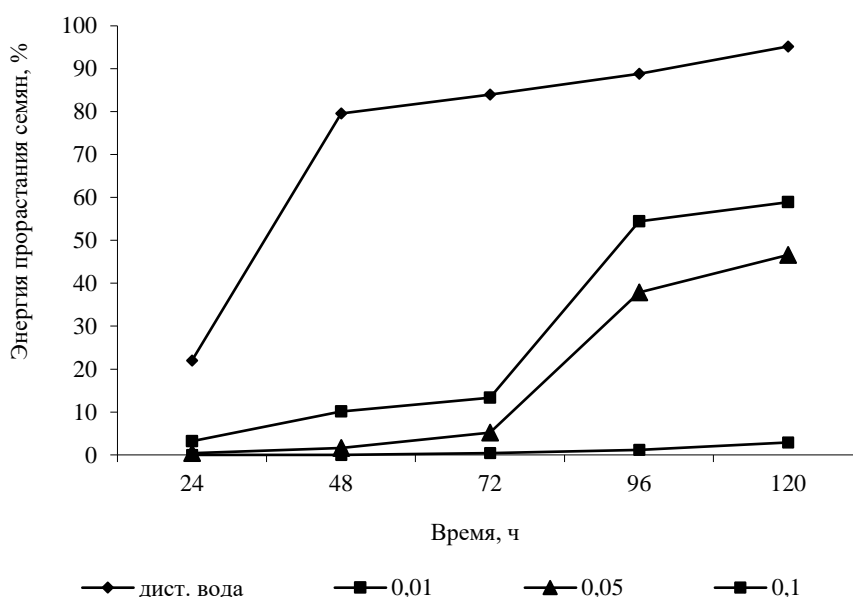


Рис. 1. Влияние разной концентрации  $Pb(NO_3)_2$  на энергию прорастания семян *Melilotus albus* /  
Fig. 1. The effect of different concentrations of  $Pb(NO_3)_2$  on the germination energy of *Melilotus albus* seeds

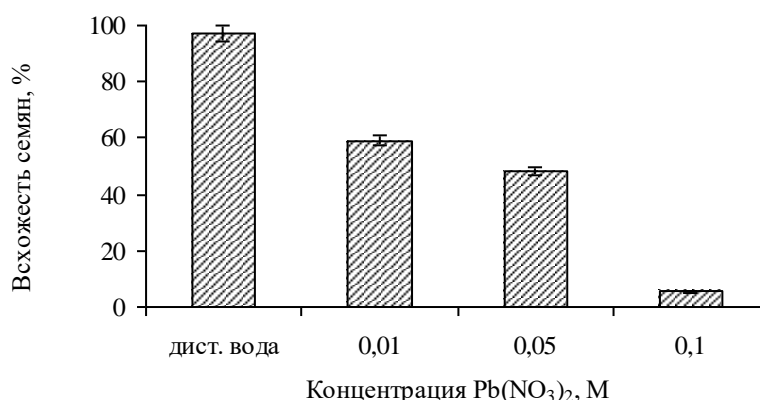


Рис. 2. Влияние разной концентрации  $Pb(NO_3)_2$  на всхожесть семян *Melilotus albus* /  
Fig. 2. The effect of different concentrations of  $Pb(NO_3)_2$  on germination of *Melilotus albus* seeds

Одним из первичных участков токсического действия свинца является плазмалемма. Изменение ее проницаемости, а следовательно, и ионного баланса может быть результатом ингибирования  $H^+$ -АТФазы и изменения липидного состава мембран<sup>1</sup>. Д. И. Башмаковым [3,

с. 66–71] было отмечено, что с ростом стрессовой концентрации свинца относительная проницаемость мембран в листьях огурца (*Cucumis sativus* L.) заметно повышается.

В ходе работы было отмечено, что максимальный выход электролитов из корней семидневных проростков донника белого обнаружен в варианте 0,01М  $Pb(NO_3)_2$ , в 3,0 раза больше, чем в контроле. Проницаемость листьев проростков *Melilotus albus* была в 1,1–1,8 раза меньше, чем корней. Максимальная скорость выхода электролитов

<sup>1</sup> Бганцова М. В. Использование горчицы сарептской и райграса пастбищного для фиторемедиации загрязненных свинцом почв: дис. ... канд. биол. наук: 06.01.03. М., 2011. 116 с. URL: <https://www.dissercat.com/content/ispolzovanie-gorchitsy-sareptskoi-i-raigrasa-pastbishchnogo-dlya-fitoremedia-tsii-zagryaznenn> (дата обращения 10.03.2023).

была обнаружена у особей, выращенных на водных растворах с концентрацией 0,01 М  $Pb(NO_3)_2$ ,

а минимальная проницаемость – в контроле ( $P < 0,05$ ; t-критерий Стьюдента) (рис. 3).

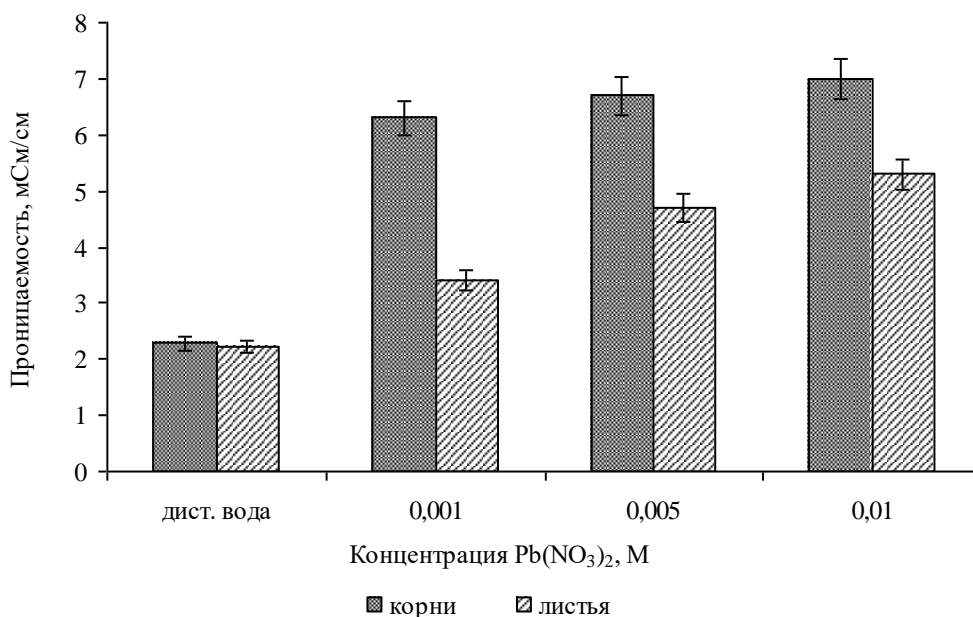


Рис. 3. Влияние растворов нитрата свинца на проницаемость клеточных мембран семидневных проростков *Melilotus albus* / Fig. 3. The effect of lead nitrate solutions on the permeability of cell membranes of seven-day-old *Melilotus albus* seedlings

Таким образом, 0,01–0,1 М растворы  $Pb(NO_3)_2$  достаточны для оказания токсического действия на состояние клеточных мембран, нарушая липидный комплекс последних, что приводит к выходу электролитов из клетки и изменению ее ионного баланса.

Поступив в ткани зародыша, металлы могут оказывать токсическое действие на рост зародышевого корня, что приводит к ингибированию роста корня после проклевывания [11, с. 103–179].

Рост корня более чувствителен к тяжелым металлам, чем рост побега. Это коррелирует с преимущественным накоплением тяжелых металлов в корнях. М. Wierzbicka и D. Antosewicz [14, с. 351–423] наблюдали линейное уменьшение роста корня в пределах 3750–12371 для ячменя и 1722–4828 мг Рb/кг для кукурузы. Ингибирование роста корней ячменя начиналось при содержании примерно 525 мг, а у кукурузы при 183 мг Рb/кг сухой массы.

Нами проанализировано влияние  $Pb(NO_3)_2$  на процессы роста главного корня и побегов проростков донника белого. Было выявлено уменьшение длины главного корня у проростков в зависимости от концентрации  $Pb(NO_3)_2$ : контроль  $> 0,001$  М  $> 0,05$  М  $> 0,1$  М. Также было отмечено,

что в присутствии ионов свинца наблюдалось уменьшение и высоты побегов проростков донника белого в 1,1–1,9 раз по сравнению с контролем. Минимальной высотой побегов характеризовались проростки, выращенные на растворе 0,01 М  $Pb(NO_3)_2$  (рис. 4). При сравнении с контролем, достоверно значимыми отличия оказались во всех вариантах ( $P < 0,05$ ), кроме варианта с концентрацией 0,001 М  $Pb(NO_3)_2$  ( $P = 0,608$ ).

Таким образом, при относительно низких концентрациях металла корни развиваются лучше, чем зеленая часть, а при достаточно высоких – наоборот. Значит, концентрация свинца 0,01 М оказалась высокой для изучаемого растения.

### Заключение

В течение 48 часов 0,1 М раствор  $Pb(NO_3)_2$  ингибировал прорастание семян донника белого. С увеличением концентрации свинца в водном растворе всхожесть семян *Melilotus albus* снижались в 1,5–7,8 раза по сравнению с контролем. При увеличении концентрации ионов свинца в водном растворе вымываемость внутриклеточных электролитов из тканей главного корня и листьев увеличивалась в 2,7–3,0 и 1,6–2,4 раза соответственно. В условиях повышающегося

загрязнения среды свинцом происходило уменьшение в 1,1–2,1 раза длины корней и в 1,1–1,3 раза высоты побегов проростков, что, по-

видимому, связано с накоплением металла в растительных тканях, и, как следствие, торможение активности меристем.

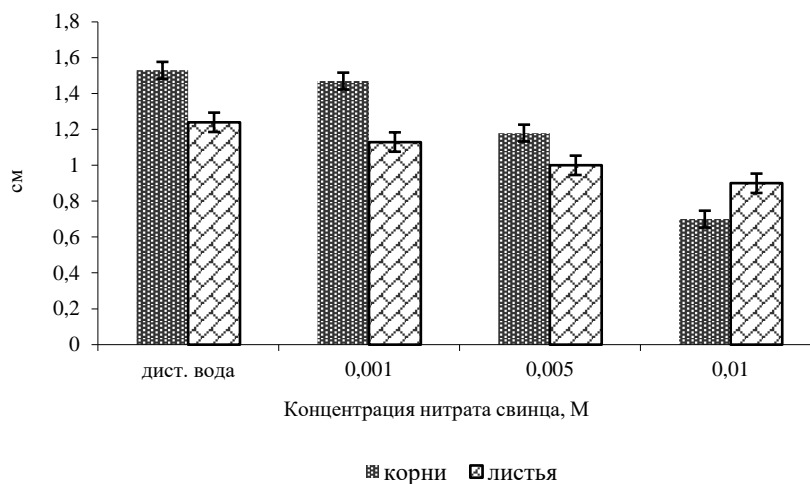


Рис. 4. Влияние растворов нитрата свинца на морфологические параметры семидневных проростков *Melilotus albus* /  
Fig. 4. The effect of lead nitrate solutions on the morphological parameters of seven-day-old *Melilotus albus* seedlings

1. Арохорова Н. В., Матвеев Н. М., Павловещи В. А. Аккумуляция тяжелых металлов дикорастущими и культурными растениями в лесостепном и степном Поволжье: монография. Самара, 1998. 131 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46219413> (дата обращения: 12.02.2023).
2. Барышникова О. С., Казьмина Е. А., Голикова К. Д. Анализ содержания тяжелых металлов в системе почва-растение // Модели и технологии природообустройства (региональный аспект). 2020. № 2 (11). С. 22–26. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44513317> (дата обращения 23.02.2023).
3. Башмаков Д. И., Лукаткин А. С. Аккумуляция тяжелых металлов некоторыми высшими растениями в разных условиях местообитания // Агрохимия. 2002. № 9. С. 66–71. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21423042> (дата обращения 11.02.2023).
4. Борисочкина Т. И., Котельникова А. Д., Рогова О. Б. Массоперенос химических элементов и их соединений в агроценозах // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. 2022. № 110. С. 114–147. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-110-114-147>
5. Демиденко Г. А. Влияние свинца на рост и развитие семян и проростков гороха овощного // Вестник КрасГАУ. 2019. № 4 (145). С. 16–23. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38510360> (дата обращения 28.02.2023).
6. Жуйкова Т. В., Позолотина В. Н., Безель В. С. Разные стратегии адаптации растений к токсическому загрязнению среды тяжелыми металлами (на примере *Tagetes officinale* s. l.) // Экология. 1999. № 3. С. 189–196. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22519486> (дата обращения 01.03.2023).
7. Ивлева Д. Ю., Мещерякова Г. В. Содержание тяжелых металлов в объектах окружающей среды // Современные научные исследования и разработки. 2018. № 12 (29). С. 366–369. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37033625> (дата обращения 22.02.2023).
8. Пугаев С. В. Особенности аккумуляции тяжелых металлов продуктивной частью сельскохозяйственных растений в различных агроэкологических условиях республики Мордовия // Агрохимия. 2020. № 12. С. 71–80. DOI: <https://doi.org/10.31857/S000218812012008X>
9. Серегин И. В., Кожевникова А. Д. Распределение кадмия, свинца, никеля и стронция в набухающих зерновках кукурузы // Физиология растений. 2005. Т. 52. № 4. С. 635–640. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9151023> (дата обращения 12.02.2023).
10. Серегин И. В., Шпигун Л. К., Иванов В. Б. Распределение и токсическое действие свинца, кадмия на корни кукурузы // Физиология растений. 2004. Т. 50. № 4. С. 582–591. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17709391> (дата обращения 12.02.2023).
11. Тяжелые металлы в агроценозах: миграция, действие, нормирование / под ред. Н. И. Санжаровой, П. Н. Цыгвинцевой. Обнинск: Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, 2019. С. 103–179. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42429318> (дата обращения 01.03.2023).

12. Тяжелые металлы в окружающей среде и их влияние на сельскохозяйственные растения / А. В. Погорелов, В. Э. Лазько, В. И. Шматок, А. И. Мельченко // Рисоводство. 2021. № 4 (53). С. 54–61. DOI: <https://doi.org/10.33775/1684-2464-2021-53-4-54-61>

13. Филиппов А. П., Шувалов О. Н., Волкова Г. В. Накопление, распределение, методы и приборы для количественного определения подвижных форм тяжелых металлов в почве и сельскохозяйственных растениях // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2019. № 78. С. 125–136. DOI: <https://doi.org/10.21515/1999-1703-78-125-136>

14. Wierzbicka M., Antosiewicz D. How lead can easily enter the food chain a study of plant roots // Sci. Total Environ. 1993. Vol. 62. Pp. 351–423. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8108708/> (дата обращения 01.03.2023).

*Статья поступила в редакцию 26.05.2023 г.; одобрена после рецензирования 23.06. 2023 г.; принята к публикации 05.07.2023 г.*

## Об авторе

### Алябшышева Елена Александровна

кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры экологии, Марийский государственный университет (424000, Российская Федерация, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8101-7941>, [e\\_alab@mail.ru](mailto:e_alab@mail.ru)

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

1. Arokhorova N. V., Matveev N. M., Pavloveshi V. A. Akkumulyatsiya tyazhelykh metallov dikorastushchimi i kul'turnymi rasteniyami v lesostepnom i stepnom Povolzh'e : monografiya [Accumulation of heavy metals by wild and cultivated plants in the forest-steppe and steppe Volga region : monograph]. Samara, 1998, 181 p. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46219413> (accessed 12.02.2023). (In Russ.).

2. Baryshnikova O. S., Kazmina E. A., Golikova K. D. Analiz sodержaniya tyazhelykh metallov v sisteme pochva-rastenie [Analysis of the content of heavy metals in the soil-plant system]. *Modeli i tekhnologii prirodoobustroistva (regional'nyi aspekt) = Models and Technologies of Environmental Management (regional aspect)*, 2020, no. 2 (11), pp. 22–26. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44513317> (accessed 23.02.2023). (In Russ.).

3. Bashmakov D. I., Lukatkin A. S. Akkumulyatsiya tyazhelykh metallov nekotorymi vysshimi rasteniyami v raznykh usloviyakh mestoobitaniya [Accumulation of heavy metals by some higher plants in different habitat conditions]. *Agrokimiya = Agrochemistry*, 2002, no. 9, pp. 66–71. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21423042> (accessed 11.02.2023). (In Russ.).

4. Borisochkina T. I., Kotelnikova A. D., Rogova O. B. Massoperenos khimicheskikh elementov i ikh soedinenii v agrotsenozakh [The mass transfer of chemical elements and of their compounds in agrocenoses]. *Byulleten' Pochvennogo instituta im. V. V. Dokuchaeva = Dokuchaev Soil Bulletin*, 2022, no. 110, pp. 114–147. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-110-114-147>

5. Demidenko G. A. Vliyanie svintsa na rost i razvitie semyan i prorstkov gorokha ovoshchnogo [The influence of lead on growth and development of seeds and seed growth of vegetable pea]. *Bulletin of KSAU = Bulletin of KSAU*, 2019, no. 4 (145), pp. 16–23. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38510360> (accessed 28.02.2023). (In Russ.).

6. Zhukova T. V., Pozolotina V. N., Bezel V. S. Raznye strategii adaptatsii rastenii k toksicheskomu zagryazneniyu srede tyazhelymi metallami (na primere Taraxacum officinale s. l.) [Different strategies of plant adaptation to toxic environmental pollution with heavy metals: an example of Taraxacum officinale s. l.]. *Ekologiya = Russian Journal of Ecology*, 1999, no. 3, pp. 189–196. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22519486> (accessed 01.03.2023). (In Russ.).

7. Ivleva D. Ju., Meshcheryakova G. V. Soderzhanie tyazhelykh metallov v ob"ektakh okruzhayushchei srede [The content of heavy metals in environmental objects]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i razrabotki = Modern Scientific Research and Development*, 2018, no. 12 (29), pp. 366–369. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37033625> (accessed 22.02.2023). (In Russ.).

8. Pugaev S. V. Osobennosti akkumulyatsii tyazhelykh metallov produktivnoi chast'yu sel'skokhozyaystvennykh rastenii v razlichnykh agroekologicheskikh usloviyakh respubliki Mordoviya [Peculiarities of heavy metals accumulation in productive part of crop plants in different agro-ecological conditions of the republic of Mordovia]. *Agrokimiya = Agrochemistry*, 2020, no. 12, pp. 71–80. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S000218812012008X>

10. Seregin I. V., Kozhevnikova A. D. Raspredelenie kadmiya, svintsa, nikelya i strontsiya v nabukhayushchikh zernovkakh kukuruzy [Distribution of cadmium, lead, nickel, and strontium in imbibing maize caryopses]. *Fiziologiya rastenii = Russian Journal of Plant Physiology*, 2005, vol. 52, no. 4, pp. 635–640. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9151023> (accessed 12.02.2023). (In Russ.).

11. Seregin I. V., Shpigun L. K., Ivanov V. B. Raspredelenie i toksicheskoe deistvie svintsa, kadmiya na korni kukuruzy [Distribution and toxic effect of lead, cadmium on corn roots]. *Fiziologiya rastenii = Russian Journal of Plant Physiology*, 2004, vol. 50, no. 4, pp. 582–591. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17709391> (accessed 12.02.2023). (In Russ.).

12. Tyazhelye metally v agrotsenozakh: migratsiya, deistvie, normirovanie [Heavy metals in agrocenoses: migration, effect, regulation]. Ed. by N. I. Sanzharova, P. N. Tsygvintseva, Obninsk, Publ. House of the All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, 2019, pp. 103–179. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42429318> (accessed 01.03.2023). (In Russ.).

13. Pogorelov A. V., Lazko V. E., Shmatok V. I., Melchenko A. I. Tyazhelye metally v okruzhayushchei srede i ikh vliyanie na sel'skokhozyaistvennye rasteniya [Heavy metals in the environment and their impact on agricultural plants]. *Risovodstvo = Rice Growing*, 2021, no. 4 (53), pp. 54–61. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33775/1684-2464-2021-53-4-54-61>

14. Filippov A. P., Shuvalov O. N., Volkova G. V. Nakoplenie, raspredelenie, metody i pribory dlya kolichestvennogo opredeleniya podvizhnykh form tyazhelykh metallov v pochve i sel'skokhozyaistvennykh rasteniyakh [Accumulation, distribution, methods and tools for the quantitative determination of mobile forms of heavy metals in soil and agricultural plants]. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Proceedings of the Kuban State Agrarian University*, 2019, no. 78, pp. 125–136. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21515/1999-1703-78-125-136>

15. Wierzbicka M., Antosiewicz D. How lead can easily enter the food chain a study of plant roots. *Sci. Total Environ*, 1993, vol. 62, pp. 351–423. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8108708/> (accessed 01.03.2023). (In Eng.).

*The article was submitted 26.05.2023; approved after reviewing 23.06.2023; accepted for publication 05.07.2023.*

### About the author

#### Elena A. Alyabysheva

Ph. D. (Biology), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Ecology, Mari State University (1 Lenin Sq., Yoshkar-Ola 424000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8101-7941>, [e\\_alab@mail.ru](mailto:e_alab@mail.ru)

*The author has read and approved the final manuscript.*