



Научная статья

2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

УДК 632.122; 614.7; 622.882

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.027



ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ФИТОРЕМЕДИАЦИИ ПРИ ОЧИСТКЕ ПОЧВ ОТ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Ольга Юрьевна Сартакова¹, Ольга Михайловна Горелова²

^{1,2} Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

¹ olga-sartakova@yandex.ru

² osgor777@mail.ru

Аннотация. Техногенная нагрузка на окружающую среду приводит к загрязнению земель и исключает их из хозяйственного оборота. С целью возврата почв в сельскохозяйственный оборот необходимо проводить различные рекультивационные работы. В современных условиях агрохимические методы мелиорации земель конкурируют с биологическими, последние отличаются меньшей энерго- и ресурсоемкостью и большей экологичностью. Тяжелые металлы тормозят развитие растений, накапливаются в них и передаются по пищевой цепи. Данные токсиканты поступают в почву, водные объекты в результате антропогенной деятельности: функционирования металлургических и энергетических комплексов, эксплуатации транспорта и сельхозтехники, использования агрохимикатов. В связи с аграрной спецификой Алтайского края, эта проблема актуальна для данного региона. Загрязнение тяжелыми металлами отражается на количестве и качестве получаемой сельхозпродукции. Эффективным методом очистки почв от указанных поллютантов является фиторемедиация. В работе на первом этапе были проведены исследования по поиску культур – ремедиантов и биотестеров, имеющих отклик на наличие тяжелых металлов в почве. Изучалось изменение биометрических и гравиметрических характеристик овса посевного в зависимости от содержания ионов кадмия в почве. На втором этапе изучалось влияние присутствия в почвенном субстрате ионов кадмия, свинца, цинка и никеля на такие культуры, как люцерна, гречиха, овес. Исследовалась фитоаккумуляция поллютантов в биомассе растений. По результатам проведенных исследований были сформулированы рекомендации по применению указанных культур как биотестеров или фиторемедиантов исходя из отклика растений и их выявленных кумулятивных способностей.

Ключевые слова: фиторемедиация, биотестирование, ионы тяжелых металлов, загрязненные сельскохозяйу́дья, тяжелые металлы, кадмий, свинец, цинк, никель, овес посевной, гречиха, люцерна, рекультивация.

Для цитирования: Горелова О.М., Сартакова О.Ю. Исследования по фиторемедиации при очистке почв от тяжелых металлов // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 176–181. doi: 10.25712/ASTU. 2072-8921.2025.02.027. EDN: <https://elibrary.ru/SMIZTQ>.

Original article

RESEARCH ON PHYTOREMEDIATION OF HEAVY METALS IN SOIL

Olga Y. Sartakova¹, Olga M. Gorelova²

^{1,2} Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

¹ olga-sartakova@yandex.ru

² osgor777@mail.ru

Abstract. Human impacts on the environment lead to land pollution and exclude this territory from economic use. Various reclamation works must be carried out to return soils for agricultural use. In modern conditions, agrochemical land reclamation methods compete with biological ones, the latter being less energy- and resource-intensive and more environmentally friendly. Heavy metals inhibit plant growth, accumulate in them, and transfer through the food chain. These toxicants enter the soil and water bodies due to anthropogenic activity: the operation of metallurgical and energy complexes, transport and agricultural machinery, and agrochemicals. Due to the agricultural specifics of the Altai Krai, this problem is relevant for this region. Heavy metal pollution affects the quantity and quality of agricultural products. An effective method of cleaning soils from these pollutants is phytoremediation. In the first stage of the work, research was conducted to find remediant cultures and biotesters that respond to the presence of heavy metals in the soil. The change in biometric and gravimetric characteristics of oats was analyzed depending on the content of cadmium ions in the soil. The influence of cadmium, lead, zinc and nickel ions in the soil substrate on crops such as medicago, buckwheat and oats was investigated in the second stage. Phytoaccumulation of pollutants in plant biomass was considered. Based on the research results, recommendations were formulated for using the specified crops as biotesters or phytoremediants, considering the plants' reaction and their identified cumulative abilities.

Keywords: phytoremediation, biotesting, heavy metal ions, contaminated agricultural land, heavy metals, cadmium, lead, zinc, nickel, oats, buckwheat, medicago, soil reclamation.

© Сартакова О. Ю., Горелова О. М., 2025

For citation: Sartakova O. Y. & Gorelova O. M. (2025). Research on phytoremediation of heavy metals in soil. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 176-181. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.027. EDN: <https://elibrary.ru/SMIZTQ>.

ВВЕДЕНИЕ

Почвенный слой является важнейшим ресурсом для аграрной отрасли. Сельскохозяйственные угодья производят около 90 процентов всей пищевой продукции и сырья, пригодного для использования в других отраслях хозяйства. Качество почв определяет урожайность сельскохозяйственных культур и безопасность продукции.

В процессе поглощения из почвы питательных элементов, через корневую систему в растения могут поступить токсичные вещества, которые по пищевой цепочке передаются человеку.

Для тяжелых металлов почвы представляют собой хорошую депонирующую среду. Это позволяет соединениям металлов прочно сорбироваться в почве и вступать во взаимодействия с почвенным гумусом. В результате такого взаимодействия могут образовываться труднорастворимые соединения, что является ключевым фактором накопления тяжелых металлов в почве.

При совокупности некоторых условий, в почве создаются благоприятные условия для миграции и переноса разного рода веществ как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении почвенного профиля.

Загрязнение атмосферы влечет за собой загрязнение всех компонентов окружающей среды, поэтому при попадании ионов тяжелых металлов в воздух, они будут обнаруживаться и в водоемах, и в почве.

Выбросы могут быть произведены как автомобильным транспортом, так и тепловыми электростанциями, если они находятся рядом с местом загрязнения, другие промышленные предприятия, химические средства защиты сельскохозяйственных культур от болезней и вредителей. Минеральные и органические удобрения вносят свой вклад в загрязнение тяжелыми металлами, как и орошение водой, обогащенной ионами тяжелых металлов [1].

На данный момент существует обострение экологической ситуации в нескольких регионах в России, в том числе и в Алтайском крае, по причине ненормированного внесения удобрений, которые в своем составе содержат тяжелые металлы.

Уровень накопления металлов в почве определяется их концентрацией [2]:

- в минеральных удобрениях;
- почвенных мелиорантах;
- водах, в том числе сточных, применяемых для орошения угодий.

При совокупности определенных условий, ионы тяжелых металлов, которые находятся в минеральных удобрениях, могут обладать высокой подвижностью в почвах, что позволяет им быстро проникать в клетки растений и по пищевым цепям поступать в организм животных и человека.

Наибольшую угрозу создают элементы с очень высоким (Cd, Hg, Cu, Cr, Sn) и высоким (Mo, Mn, Ni, Fe, Se) транслокационным потенциалом загрязнения. Переход тяжелых металлов, содержащихся в агрохимикатах, в почвенные растворы определяет вероятность присутствия их в субстрате. Металлы, находящиеся в составе малорастворимых соединений могут находиться в большей мере в неподвижной форме, в хорошо растворимых – в подвижной форме.

В технологии фиторемедиации предлагается использование двух типов растений [3]:

- 1) аккумуляторы или фиторемедианты, которые аккумулируют тяжелые металлы в надземных органах как при низком, так и высоком содержании их в почве;
- 2) биотестеры, которые сигнализируют о превышении ПДК тяжелых металлов в почве ввиду своей высокой чувствительности к данному явлению.

Таблица 1 – Содержание накопленных металлов в почве в зависимости от агротехнического источника загрязнения почв микроэлементами (мг/кг сухой массы)

Table 1 – Content of accumulated metals in the soil depending on the agrotechnical source of soil pollution with microelements (mg/kg dry mass)

Ион	Сточными водами	Фосфорные удобрения	Известняки	Азотные удобрения
Ni ²⁺	16-5300	7 - 38	10-20	7-34
Pb ²⁺	50 – 3000	7 - 225	20 - 1250	2 – 27
Zn ²⁺	700 – 49000	50-1450	10-450	1-42
Cd ²⁺	2 – 1500	0,1 – 170	0,04 – 0,1	0,05 – 8,5

Среди аккумуляторов можно выделить также растения гипер-аккумуляторы, которые способны накапливать тяжелые металлы в очень большом количестве без каких-либо отрицательных последствий для организма.

Растения-аккумуляторы и их толерантность к какому-либо металлу является специфичной. То есть, одна культура может поглощать один металл и подавляться на другом. Например, овес проявляет способность к аккумуляции цинка, однако свинец он поглощает значительно хуже [4].

У растений могут формироваться отдельные популяции, которые при этом проявляют устойчивость к двум и более металлам (множественную).

На содержание металла в корнях и побегах оказывает влияние его количество в почве, а также вид растения, фаза развития, сезон года [5].

Целью настоящих исследований являлось выявление возможности фиторемедиации ионов никеля, свинца, цинка, кадмия такими растениями, как люцерна, овес, гречиха.

При проведении эксперимента по фиторемедиации готовились образцы суглинистой почвы. Это связано с преобладанием на пахотных землях Алтайского края почв такого типа.

Изучалось угнетающее влияние тяжелых металлов кадмия, никеля, цинка и свинца в концентрациях, типичных представителей поллютантов земель Алтайского края.

Наличие кадмия в почве объясняется применением суперфосфата, который вносится перед посевом и как подкормка для практически всех сельскохозяйственных культур [6].

Свинец поступает в окружающую среду, как правило, в составе отходов производства и потребления (аккумуляторный лом, отработанные батарейки и др.).

Наличие никеля и цинка в почве можно объяснить попаданием в нее недостаточно очищенных производственных стоков, шламов, никелированного и оцинкованного металлолома.

Ключевым фактором в выборе культур для исследования было то, что овес, гречиха и люцерна широко распространены на территории Алтайского края.

Оптимальное сочетание климатических факторов, связанных с поступлением солнечной радиации, теплообеспеченности, наличием влаги от осадков обеспечивает произрастание данных культур на территории края.

Кроме того, по данным исследований А. Ф. Титова было установлено, что растения, относящиеся к семейству злаковых, отличаются способностью к выделению веществ – фитосидерофоров. Данные вещества попадают в слой почвы, который непосредственно контактирует с корневой системой растения [3].

Фитосидерофоры оказывают воздействие на процесс поглощения тяжелых металлов, тем самым ускоряя его. Этот факт также повлиял на выбор овса гречихи в качестве фиторемедиантов.

Также многочисленные исследования позволили рассматривать семейства бобовые в качестве фиторемедианта [7].

МЕТОДЫ

Для создания в почве потенциально-угнетающих факторов, к чистым субстратам добавлялись следующие соли тяжелых металлов: сульфаты цинка и никеля, ацетат меди и нитрат кадмия.

В таблице 2 представлены предельно допустимые концентрации для данных металлов в почве согласно СанПиНу 1.2.3685-21 [8].

Таблица 2 – Предельно допустимые концентрации тяжелых металлов в почве, мг/кг

Table 2 – Maximum permissible concentrations of heavy metals in soil, mg/kg

Элемент	Pb	Zn	Cd	Ni
Значение	6,0	23,0	0,5	4,0

Почвенный субстрат брался массой 200 г. Тяжелые металлы вносились в таком количестве, чтобы в почве была концентрация 1 ПДК, 1,5 ПДК и 2 ПДК соответственно.

Семена выбранных культур предварительно проращивались на бумажных фильтрах в воздухопроницаемых боксах при благоприятном температурном режиме от 25 °С до 28 °С, и необходимой степени увлажнения. Срок выдерживания семян до появления проростков составил трое суток.

Далее проводилась высадка проросших семян в почву исследуемых образцов и наблюдение за ними в течение 20 дней.

На протяжении роста растений производился визуальный контроль всходов, оценивались и корректировались следующие показатели: температурный, влажностный режимы, а также степень освещенности.

Затем ростки аккуратно изымались из почвенного субстрата, промывались, подсушивались при комнатной температуре до постоянного веса.

Для анализа морфологических особенностей растений в качестве методов анализа применяли гравиметрию и биометрию.

При гравиметрии производилось взвешивание всего растения на аналитических весах, биомасса оценивалась в граммах с точностью до тысячных.

При биометрии исследуемые растения предварительно разделялись на наземную и подземную части, после чего анализировались – оценивался размер каждой части растения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Гречиха более выражено отреагировала на присутствие тяжелых металлов в почве. Она была подвер-

жена сильному угнетению на почве с тяжелыми металлами, поэтому не может рассматриваться в качестве культуры для фиторемедиации. Было решено отнести гречиху к тестовым культурам, которые чувствительны к наличию металлов в почве и могут сигнализировать о повышении предельно допустимых концентраций.

В качестве потенциальных фиторемедиаторов были рассмотрены две культуры: овес и люцерна.

Результаты биометрического анализа побега и корневой системы овса представлены на рисунках 1, 2.

Присутствие цинка и свинца оказали подавляющее воздействие на длину побега, а кадмий и никель простимулировали рост побега.

Влияние на корневую систему присутствия тяжелых металлов было несколько иным: подавляющим эффектом на корень обладали свинец и никель, в то время как цинк и кадмий усилили рост корневой части растения.

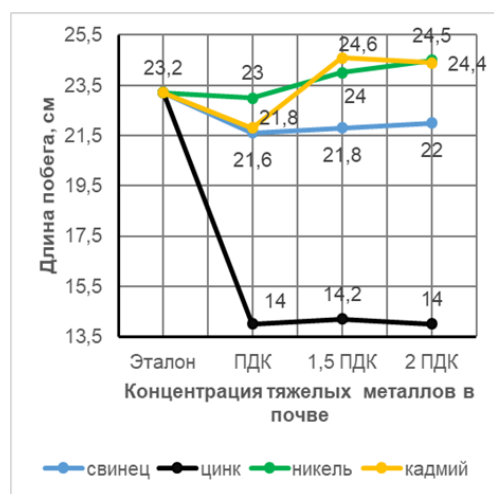


Рисунок 1 – Влияние тяжелых металлов на биометрические показатели побега овса

Figure 1 – The effect of heavy metals on biometric indicators of oat shoot

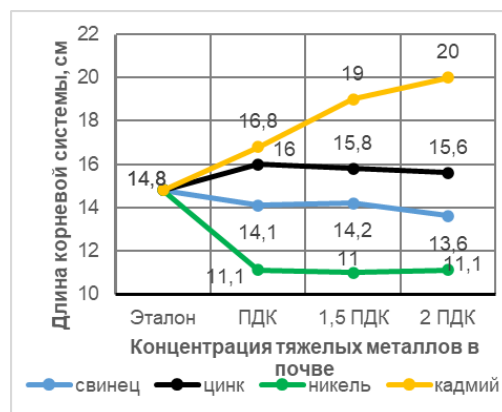


Рисунок 2 – Влияние тяжелых металлов на биометрические показатели корневой системы овса

Figure 2 – The influence of heavy metals on the biometric parameters of the oat root system

Гравиметрический анализ (рисунок 3) продемонстрировал увеличение массы растений по сравнению с контролем только на субстратах с кадмием.

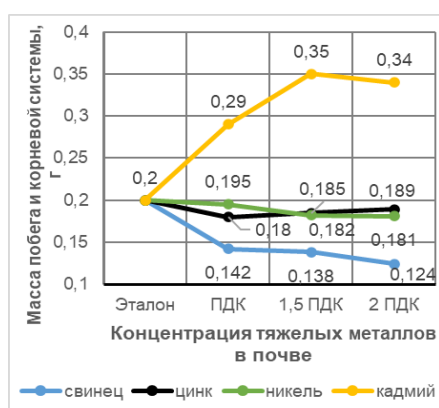


Рисунок 3 – Влияние тяжелых металлов на гравиметрические показатели овса

Figure 3 – Influence of heavy metals on gravimetric parameters of oats

В дальнейшем аналогичные исследования проводили для люцерны (рисунки 4-6).

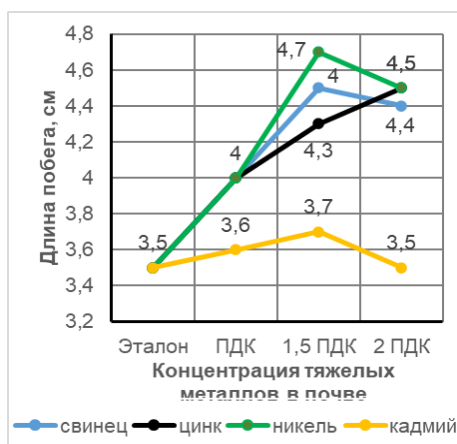


Рисунок 4 – Влияние тяжелых металлов на биометрические показатели надземной части люцерны

Figure 4 – The influence of heavy metals on the biometric parameters of the aboveground alfalfa



Рисунок 5 – Влияние тяжелых металлов на биометрические показатели корневой системы люцерны

Figure 5 – The effect of heavy metals on the biometric parameters of the alfalfa root system

Все исследуемые образцы почв позволили получить растения с большей длиной побега чем контрольный, что говорит о стимулировании, при этом наибольший рост наблюдался на субстрате с никелем. Анализ корневой системы люцерны показал, что подавление развития наблюдалось лишь на почве с кадмием, а максимальное стимулирование проявил свинец.

Гравиметрические исследования растений люцерны (рисунок 6) свидетельствуют о снижении массы растений в присутствии цинка в почвенных образцах. Наибольшая масса растений была достигнута на субстратах с кадмием.

Потенциальные фиторемигранты анализировались с помощью атомно-абсорбционного спектрометра МГА-1000 по известной методике [9, 10]. Оценивалась степень поглощения тяжелых металлов биомассой растений: овса, люцерны, как выращенных на субстратах с поллютантами, так и на незагрязненной почве (фон). Анализировалась биомасса всего растения, включающая надземную, подземную часть.

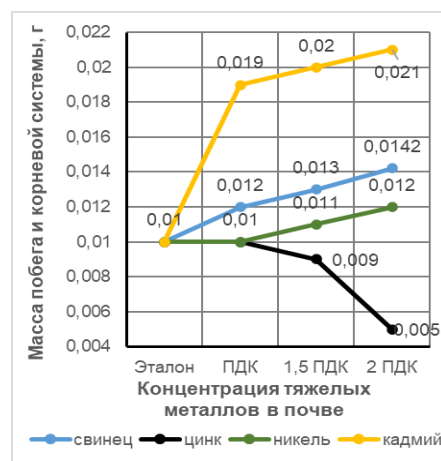


Рисунок 6 - Влияние тяжелых металлов на гравиметрические показатели люцерны

Figure 6 - Influence of heavy metals on alfalfa gravimetric parameters

Определение содержания металлов в биомассе растений включало два этапа:

- 1) подготовка образцов проб методом мокрой минерализации;
- 2) анализ проб на атомно-абсорбционном спектрометре.

Метод мокрой минерализации предполагал подготовку навески растений, массой 0,5 – 1 г. Далее навеску помещали в колбу и проводили разрушение органических веществ концентрированной азотной кислотой в объеме 10 см³. Полученный раствор выдерживался 15 минут и затем упаривался до 3 – 5 см³. После чего в раствор добавлялась 30%-ная перекись водорода, порциями по 1 см³. Полученный раствор вновь упаривался до 3 – 5 см³. Минерализованную пробу переносили в колбу объемом 50 мл и доводили до нужного объема бидистиллированной водой.

Метод атомно-абсорбционной спектроскопии основан на резонансном поглощении или абсорбции излучения от источника свободными атомами определяемых элементов, которые образуются в процессе электротермической атомизации в графитовой кювете спектрометра.

Полученные результаты анализа проб представлены в таблицах 3 и 4.

<https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата доступа 29.01.2025).

9. ГОСТ Р 55447-2013. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Определение содержания кадмия, свинца, мышьяка, ртути, олова методом атомно-абсорбционной спектроскопии. М.: Стандартинформ. 2014. 18 с.

10. Измерение массовой доли элементов (As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, V, Zn) в пробах почв, грунтов, донных отложений и осадков сточных вод. Методика М 03-07-2014 ПНД Ф 16.1:2.2:2.2:2.3.63-09 (изд. 2014) ПУ 62-2017 СТ РК 2.377-2015.

Информация об авторах

О. Ю. Сартакова – кандидат технических наук, доцент Международной кафедры ЮНЕСКО «Инженерная экология» института биотехнологий, пищевой и химической инженерии АлтГТУ.

О. М. Горелова – кандидат технических наук, доцент Международной кафедры ЮНЕСКО «Инженерная экология» института биотехнологий, пищевой и химической инженерии АлтГТУ.

REFERENCES

1. Selyukova, S.V. (2016). Heavy metals in organic fertilizers. *Agrochemical Bulletin*, (5), 47-51. (In Russ.).

2. Lukin, S.V. & Selyukova, S.V. (2016). Agroecological assessment of the effect of organic fertilizers on the microelement composition of soils. *Achievements of science and technology of the agroindustrial complex*, (12), 61-67. (In Russ.).

3. Elizarieva, E. N., Yanbaev, Yu.A. & Kulagin, A. Yu. (2016). Features of the choice of phytoremediation technologies for cleaning soils and wastewater from heavy metal ions // *Bulletin of the Udmurt University. The series "Biology. Earth Sciences"*, (3), 7-18. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-vybora-fitoremediatsionnyh-tehnologiy-ochistki-pochv-i-stochnyh-vod-ot-ionov-tyazhelyh-metallov>. (In Russ.).

4. Dhaliwal, S. S. [et al.] (2020). Remediation techniques for removing heavy metals from the soil contaminated through different sources: a review // *Environmental Science and Pollution Research*. 27(2). 1319-1333. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06967-1> . URL : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31808078/>. (In Russ.).

5. Titov, A. F., Kaznina, N. M. & Talanova, V. V. (2014). Heavy metals and plants. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, p. 194. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=37019>. (In Russ.).

6. Bauer, V. V., Gorelova, O. M. & Sartakova, O. Yu. (2023). Phytoremediation as a promising method of soil purification from heavy metals. *Polzunovskiy vestnik*. (2). 160-165. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.021. EDN: <https://elibrary.ru/GXGPPD>. (In Russ.).

7. Kulik, E.N. & Radomsкая, V.I. (2011). Features of translocation of heavy metals into legumes under anthropogenic influence. *Bulletin of KrasGAU*. (8). 83-88. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-translokatsii-tyazhelyh-metallov-v-bobovye-kultury-pri-antropogennom-vozdeystvii/viewer>. (In Russ.).

8. Sanitary rules and regulations (2022). SanPiN 1.2.3685-21 "Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) safety of environmental factors for humans" (as amended on December 30, 2022): Electronic Fund of Legal and Regulatory Documents. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115>. (In Russ.).

9. ГОСТ Р 55447-2013. (2014). Feed, mixed feed, feed raw materials. Determination of cadmium, lead, arsenic, mercury, tin by atomic absorption spectroscopy. Moscow: Standardinform. 2014. 18 p. (In Russ.).

10. Measurement of the mass fraction of elements (As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, V, Zn) in food, soils, and sediments and sewage sludge (2014). Methodology М 03-07-2014 ПНД Ф 16.1:2.2:2.2:2.3.63-09. ПУ 62-2017 СТ РК 2.377-2015. (In Russ.).

Information about the authors

O. Yu. Sartakova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the International UNESCO Department "Engineering Ecology" of the Institute of Biotechnology, Food and Chemical Engineering of Polzunov Altai State Technical University.

O. M. Gorelova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the International UNESCO Department "Engineering Ecology" of the Institute of Biotechnology, Food and Chemical Engineering of Polzunov Altai State Technical University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 21 октября 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 21 Oct 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.