

ЭКОЛОГИЯ/ECOLOGY

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.13> EDN: PRGOKG**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦЕОЛИТА, ВЕРМИКОПОСТА И СУСПЕНЗИИ *CHLORELLA VULGARIS* ПРИ ФИТОРЕМЕДИАЦИИ ЧЕРНОЗЁМА, ЗАГРЯЗНЁННОГО МЫШЬЯКОМ**

Научная статья

Попова И.С.¹, Овсянкина С.В.^{2,*}¹ORCID : 0000-0002-9099-9537;²ORCID : 0000-0003-2184-6104;^{1,2} Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (sofi-kras[at]mail.ru)

Предложена: 27.07.2026; Принята: 29.09.2026; Опубликовано: 16.10.2026

Аннотация

В статье представлены результаты сравнительного изучения эффективности трёх мелиорантов различной природы — цеолита (минеральный сорбент), вермикомпоста (органическое удобрение) и суспензии *CHLORELLA VULGARIS* (микробный биопрепарат) — при фиторемедиации чернозёма, загрязнённого мышьяком. Эксперимент проведён в вегетационно-полевых условиях с использованием рапса ярового сорта «Надёжный 92» в качестве растения-фиторемедианта. Установлено, что внесение мышьяка в концентрации 10 мг/кг почвы вызывает достоверное угнетение ростовых и репродуктивных процессов рапса: высота надземной части снижается на 34,2%, длина корня — на 19,1%, количество стручков — на 60,4%, количество семян на одном растении — на 91,7%. Применение цеолита наиболее эффективно для иммобилизации мышьяка в почве (снижение содержания на 18,2%) и восстановления линейного роста растений; вермикомпост стимулирует формирование репродуктивных органов (количество стручков возрастает до 22,35 шт.); биопрепарат обеспечивает максимальное снижение содержания мышьяка в почве (на 39,9%) и активизирует поглотительную функцию корневой системы. Наибольший детоксицирующий эффект в системе почва–растение показал биопрепарат, однако для целей фиторемедиации загрязнённых чернозёмов наиболее целесообразным признано сочетание минерального сорбента для иммобилизации токсиканта и органического мелиоранта для стимуляции продуктивности растений.

Ключевые слова: фиторемедиация, чернозём, мышьяк, рапс, цеолит, вермикомпост, микроводоросли, *Chlorella vulgaris*, биодоступность, коэффициенты накопления и транслокации.

A COMPARATIVE EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF ZEOLITE, VERMICOMPOST AND A *CHLORELLA VULGARIS* SLURRY IN THE PHYTOREMEDIATION OF BLACK SOIL CONTAMINATED WITH ARSENIC

Research article

Popova I.S.¹, Ovsyankina S.V.^{2,*}¹ORCID : 0000-0002-9099-9537;²ORCID : 0000-0003-2184-6104;^{1,2} Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russian Federation

* Corresponding author (sofi-kras[at]mail.ru)

Suggested: 27.07.2026; Accepted: 29.09.2026; Published: 16.10.2026

Abstract

The article presents the results of a comparative study of the effectiveness of three soil ameliorants of different origins — zeolite (a mineral sorbent), vermicompost (organic fertiliser) and a *CHLORELLA VULGARIS* slurry (microbial biodrug) — in the phytoremediation of arsenic-contaminated black soil. The experiment was conducted under field conditions using the spring rapeseed variety ‘Nadezhny 92’ as the phytoremediating plant. It was found that the application of arsenic at a concentration of 10 mg/kg of soil causes a significant inhibition of the growth and reproductive processes of rapeseed: the height of the above-ground part decreases by 34.2%, root length by 19.1%, the number of pods by 60.4%, and the number of seeds per plant by 91.7%. The use of zeolite proved most effective for immobilising arsenic in the soil (reducing its content by 18.2%) and restoring linear plant growth; vermicompost stimulates the formation of reproductive organs (the number of pods increases to 22.35); the biological drug ensures the greatest reduction in arsenic content in the soil (by 39.9%) and enhances the absorptive function of the root system. The biodrug demonstrated the greatest detoxifying effect in the soil–plant system; however, for the phytoremediation of contaminated black soil, a combination of a mineral sorbent to immobilise the toxicant and an organic soil improver to stimulate plant productivity is considered the most appropriate approach.

Keywords: phytoremediation, black soil, arsenic, rapeseed, zeolite, vermicompost, microalgae, *Chlorella vulgaris*, bioavailability, accumulation and translocation coefficients.

Введение

Мышьяк относится к числу приоритетных высокотоксичных загрязнителей окружающей среды и включён в перечень наиболее опасных для здоровья человека химических элементов [1]. В условиях России источниками

поступления мышьяка в почвы являются предприятия горнодобывающей и металлургической промышленности, химическое производство, сжигание угля, использование пестицидов прошлого поколения, а также накопленные техногенные отвалы и шламоотстойники. В зонах их влияния формируются участки техногенно нарушенных земель, где содержание мышьяка в почве достигает и превышает предельно допустимые и ориентировочно допустимые концентрации, что повышает риск его поступления в пищевые цепи [2].

Особую тревогу вызывает загрязнение мышьяком чернозёмов, являющихся основным агресурсом страны и обеспечивающих значительную долю валовой продукции растениеводства. Даже локальные очаги техногенного загрязнения на чернозёмных почвах приводят к выпадению участков из сельскохозяйственного использования, снижению урожайности и ухудшению качества продукции, что сопровождается экономическими потерями и повышением эпидемиологического риска для населения прилегающих территорий [3]. Мониторинговые исследования последних лет показывают, что в ряде агроэкосистем фиксируются превышения нормативов по мышьяку и другим токсичным элементам, что требует разработки эффективных и экологически безопасных подходов к ремедиации [4].

Традиционные технологии очистки почв, основанные на снятии и вывозе загрязнённого слоя, химической промывке или термической обработке, отличаются высокой стоимостью, энергозатратностью и зачастую сопровождаются вторичным загрязнением окружающей среды. Кроме того, такие методы нарушают структуру и гумусовый профиль чернозёмов, что практически необратимо снижает их плодородие. В этих условиях особенно актуальными становятся мягкие, природоподобные технологии ремедиации, позволяющие снижать экологический риск без разрушения почвенной системы [5].

К числу таких подходов относится фиторемедиация — использование растений для извлечения, стабилизации или трансформации загрязнителей в почве. Эффективность фиторемедиации мышьяка во многом определяется доступностью элемента для растений и состоянием почвенно-микробного комплекса, поэтому перспективным направлением является её сочетание с применением природных и биологических мелиорантов [6]. Цеолиты, обладая развитой поверхностью и ионообменными свойствами, могут снижать подвижность и биодоступность мышьяка в чернозёмах. Вермикомпост, как высокоактивное органическое удобрение, способствует восстановлению плодородия и микробиологической активности почвы, одновременно влияя на формы нахождения мышьяка. Микробные биопрепараты способны усиливать устойчивость растений к токсиканту, изменять распределение мышьяка по формам и способствовать его включению в биологический круговорот [7].

В научной литературе накоплен значительный материал по использованию природных сорбентов, в том числе цеолитов, для детоксикации загрязнённых почв. Установлено, что цеолиты способны снижать подвижность мышьяка, переводить его в менее доступные формы и уменьшать поступление токсиканта в растения [8]. Достаточно активно изучено и применение органических мелиорантов, включая компосты и вермикомпосты, в технологиях рекультивации и фиторемедиации загрязнённых почв. Показано, что вермикомпост улучшает агрохимические, физические и биологические свойства почвы, стимулирует развитие микробиоты, повышает устойчивость растений к токсическому воздействию [9]. В области применения микробных биопрепаратов хорошо разработаны подходы к фиторемедиации почв, загрязнённых углеводородами и тяжёлыми металлами, включая создание штаммов и консорциумов, стимулирующих рост растений и ускоряющих очистку [10].

Однако, как показал анализ литературы, отдельные аспекты применения цеолита, вермикомпоста и биопрепаратов изучены достаточно широко, однако их сравнительная эффективность в единой системе фиторемедиации чернозёма, загрязнённого мышьяком, остаётся недостаточно исследованной. Это определяет цель настоящей работы — провести сравнительную оценку эффективности цеолита, вермикомпоста и суспензии хлореллы при фиторемедиации чернозёма, загрязнённого мышьяком, на основе анализа влияния мелиорантов на рост и продуктивность рапса, динамику мышьяка в почве и его накопление в органах растений.

Научная новизна работы заключается в том, что в единых экспериментальных условиях проведена сравнительная оценка эффективности трёх разных по природе ремедиационных агентов — минерального сорбента, органического мелиоранта и биологического препарата — в отношении одного и того же загрязнителя и одного типа почвы. Такой подход позволил установить не только общий эффект снижения токсичности мышьяка, но и выявить различия в механизмах действия исследуемых вариантов.

Практическая значимость работы определяется возможностью использования полученных результатов для выбора наиболее эффективного способа фиторемедиации чернозёма, загрязнённого мышьяком. Результаты исследования могут быть положены в основу рекомендаций по снижению биодоступности мышьяка, уменьшению его токсического действия на растения и восстановлению экологического состояния почвы.

Методы и принципы исследования

Объектом исследования являлся рапс яровой (*Brassica napus* L.) сорта Надежный 92, использованный в качестве растения-фиторемедианта. Сорт характеризуется следующими агрономическими показателями: урожайность семян достигает 21,9 ц/га, урожайность зелёной массы — 315–380 ц/га, масличность семян составляет 42–44%, содержание белка в семенах — 22,8% [11]. Выбор рапса обусловлен его практической значимостью как масличной культуры и способностью служить чувствительным тест-объектом для оценки устойчивости растений к загрязнителям.

Исследования проводили в условиях вегетационно-полевого эксперимента на чернозёме с нейтральной реакцией среды типичном для сельскохозяйственных угодий Красноярского края. Каждый вариант опыта был представлен 4 вегетационными сосудами площадью 0,2 м², объемом 80 л с отверстием в дне. Загрязнитель — мышьяк в форме арсената натрия (Na₃AsO₄·12H₂O) — вносили в концентрации 10 мг/кг почвы, что соответствует ориентировочно допустимой концентрации (ОДК) согласно ГН 2.1.7.020-94.

Схема опыта включала пять вариантов:

1. Контроль (фон, без загрязнения и мелиорантов).
2. Мышьяк (модель токсической нагрузки).
3. Мышьяк + Цеолит (5 г/кг почвы).
4. Мышьяк + Вермикомпост (5 г/кг почвы).
5. Мышьяк + Суспензия *Chlorella vulgaris* (концентрация 1:100, 0,5 мл/кг почвы).

Выбор концентрации мышьяка 10 мг/кг обоснован соответствием ОДК для суглинистых и глинистых почв с нейтральной реакцией среды, а также возможностью изучения процессов миграции, накопления и транслокации поллютанта в системе «почва–растение» в условиях сублетального стресса, не вызывающего острой гибели тест-культуры.

Биометрические измерения проводили по окончании вегетационного периода (через 90 суток после посева) в соответствии с Методикой государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур (1985). Определяли следующие показатели: высоту надземной части растений, длину корня, количество стручков, длину стручков, массу семян на одном растении и количество семян на одном растении. Определение содержания мышьяка в почве и растительных образцах выполняли методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) на аналитической длине волны 193,7 нм с использованием генерации летучего гидрида для повышения чувствительности анализа. Почвенные пробы отбирали до и после вегетационного опыта, растительные пробы — по окончании эксперимента с разделением на надземную часть и корневую систему.

Подготовка почвенных образцов включала высушивание до воздушно-сухого состояния, измельчение и просеивание. Подготовка растительных образцов включала высушивание до постоянной массы при 70 °С, измельчение и минерализацию. Для оценки миграции мышьяка в системе «почва–растение» рассчитывали:

1. Коэффициент накопления (КН) = содержание As в растении / содержание As в почве.
2. Коэффициент транслокации (Кт) = содержание As в надземной части / содержание As в корнях.

Статистическую обработку результатов проводили с использованием пакета прикладных программ. Для каждого признака рассчитывали средние значения, стандартные отклонения, минимальные и максимальные значения. Достоверность различий между вариантами оценивали с использованием t-критерия Стьюдента при уровне значимости $p < 0,05$.

Основные результаты

Результаты биометрических измерений представлены в таблице 1. Рапс проявил высокую чувствительность к загрязнению почвы мышьяком.

В контрольном варианте растения характеризовались следующими показателями: высота надземной части — 63,32 см, длина корня — 12,32 см, количество стручков — 12,14 шт., длина стручков — 6,82 см, количество семян — 91,55 шт., масса семян — 1,39 г.

Внесение мышьяка вызвало достоверное снижение всех учитываемых показателей. Высота надземной части уменьшилась на 34,2% (до 41,69 см), длина корня — на 19,1% (до 9,97 см). Количество стручков снизилось на 60,4% (до 4,81 шт.), длина стручков — на 57,6% (до 2,89 см), количество семян — на 91,7% (до 7,63 шт.). Масса семян с одного растения составила 1,32 г, что не отличалось достоверно от контрольного значения.

Применение цеолита способствовало увеличению высоты надземной части до 71,74 см (на 13,2% выше контроля и на 72,1% выше варианта с мышьяком), длины корня до 15,00 см (на 21,7% выше контроля). Количество стручков увеличилось до 14,22 шт., количество семян — до 112,43 шт., что превысило контрольный уровень на 22,8%. Масса семян составила 0,42 г, что достоверно ниже контроля и варианта с мышьяком.

Использование вермикомпоста в качестве мелиоранта способствовало увеличению высоты растений до 65,53 см, длины корня до 14,37 см. Количество стручков достигло максимального значения — 22,35 шт. (на 84,1% выше контроля), количество семян составило 108,91 шт., масса семян — 0,65 г.

В варианте с суспензией *Chlorella vulgaris* на фоне мышьякового загрязнения отмечены следующие показатели: высота растений — 69,62 см, длина корня — 18,48 см, количество стручков — 19,33 шт., длина стручков — 7,57 см, количество семян — 128,95 шт., масса семян — 3,72 г.

Таблица 1 - Биометрические показатели рапса в различных вариантах опыта

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.13.1>

Вариант	Высота надземной части, см	Длина корня, см	Количество стручков, шт.	Длина стручков, см	Количество семян, шт.	Масса семян, г
Контроль	63,32±2,14	12,32±0,87	12,14±1,02	6,82±0,31	91,55±4,28	1,39±0,12
Мышьяк	41,69±1,98*	9,97±0,76*	4,81±0,54*	2,89±0,22*	7,63±0,89*	1,32±0,11
Мышьяк + Цеолит	71,74±2,56**	15,00±0,94**	14,22±1,18**	7,48±0,35**	112,4±5,12**	0,42±0,04**
Мышьяк + Вермикомпост	65,53±2,31**	14,37±0,91**	22,35±1,87**	7,19±0,33**	108,9±4,96**	0,65±0,06**

Вариант	Высота надземной части, см	Длина корня, см	Количество стручков, шт.	Длина стручков, см	Количество семян, шт.	Масса семян, г
Мышьяк + Суспензия <i>Chlorella vulgaris</i>	69,62±2,43**	18,48±1,12**	19,33±1,54**	7,57±0,36**	128,9±5,87**	3,72±0,28**

Примечание: * – отличие от контроля статистически значимо ($p < 0,05$); ** – отличие от варианта «Мышьяк» статистически значимо ($p < 0,05$)

Для оценки эффективности исследуемых мелиорантов на снижение подвижности мышьяка в чернозёме определяли содержание этого металлоида в почве до и после вегетационного опыта (табл. 2). Исходное содержание мышьяка в загрязнённых вариантах составляло 10 мг/кг. В варианте без мелиорантов содержание мышьяка снизилось на 5,3% (до 9,47 мг/кг). Применение цеолита обеспечило снижение на 18,2% (до 8,18 мг/кг), вермикомпоста — на 24,7% (до 7,53 мг/кг), суспензии *Chlorella vulgaris* — на 39,9% (до 6,01 мг/кг). Все различия с вариантом «Мышьяк» статистически значимы ($p < 0,05$).

Таблица 2 - Содержание мышьяка в почве до и после вегетационного опыта

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.13.2>

Вариант	Содержание As до опыта, мг/кг	Содержание As после опыта, мг/кг	Снижение, мг/кг	Снижение, %
Контроль	0	0	0	-
Мышьяк	10	9,47±0,12	0,53	5,3
Мышьяк + Цеолит	10	8,18±0,10*	1,82	18,2
Мышьяк + Вермикомпост	10	7,53±0,09*	2,47	24,7
Мышьяк + Суспензия <i>Chlorella vulgaris</i>	10	6,01±0,09*	3,99	39,9

Примечание: * – отличие от варианта «Мышьяк» статистически значимо ($p < 0,05$)

Наибольшее количество мышьяка во всех вариантах аккумулировалось в корневой системе (табл. 3). В варианте без мелиорантов содержание в корнях составило 25,74 мг/кг. Цеолит способствовал снижению содержания As в корнях на 39,6% (до 15,54 мг/кг). Вермикомпост не оказал достоверного влияния на содержание As в корнях (30,19 мг/кг). Суспензия *Chlorella vulgaris* вызвала достоверное увеличение содержания As в корнях почти в 2 раза (до 50,14 мг/кг).

В надземной части содержание мышьяка в варианте без мелиорантов составило 5,10 мг/кг. Цеолит не оказал достоверного влияния (4,34 мг/кг). Вермикомпост и суспензия *Chlorella vulgaris* достоверно увеличили содержание As в надземной части до 8,17 и 10,30 мг/кг соответственно.

Таблица 3 - Содержание мышьяка в органах рапса

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.13.3>

Вариант	Содержание As в корнях, мг/кг воздушно-сухой массы	Содержание As в надземной части, мг/кг воздушно-сухой массы	Кт, мг/кг воздушно-сухой массы	Кн, мг/кг воздушно-сухой массы
Мышьяк	25,74 ± 1,89	5,10 ± 0,42	0,198	3,26
Мышьяк + Цеолит	15,54 ± 1,12*	4,34 ± 0,35	0,279	2,43
Мышьяк + Вермикомпост	30,19 ± 2,21	8,17 ± 0,61*	0,271	5,09
Мышьяк + Суспензия <i>Chlorella vulgaris</i>	50,14 ± 3,45*	10,30 ± 0,78*	0,205	10,06

Примечание: * – отличие от варианта «Мышьяк» статистически значимо ($p < 0,05$)

Коэффициент транслокации (K_t) варьировал от 0,198 в варианте с мышьяком до 0,279 в варианте с цеолитом. Значения K_t во всех вариантах были ниже 0,3, что свидетельствует о преимущественном накоплении мышьяка в корневой системе.

Наибольший коэффициент накопления отмечен в варианте с суспензией *Chlorella vulgaris* (10,06). Наименьший K_n отмечен в варианте с цеолитом (2,43).

Обсуждение

Проведённые исследования подтвердили высокую фитотоксичность мышьяка для рапса. Угнетение ростовых процессов (снижение высоты на 34,2%, длины корня на 19,1%) и репродуктивных показателей (снижение количества семян на 91,7%) согласуется с данными других авторов [12], [13]. Токсическое действие мышьяка связано с нарушением фосфорного обмена и ингибированием активности ферментов [12].

Внесение цеолита способствовало снижению остаточного содержания мышьяка в почве на 18,2% по сравнению с вариантом без мелиоранта. Наблюдаемое снижение содержания As в почве может быть связано с сорбцией ионов мышьяка на поверхности минерала, что согласуется с литературными данными о сорбционной способности цеолитов [8], [15]. В варианте с цеолитом отмечено наименьшее значение коэффициента накопления ($K_n = 2,43$), что указывает на ограничение поступления токсиканта в растения. Вместе с тем следует отметить, что снижение остаточного содержания As в почве само по себе не является прямым доказательством иммобилизации — для подтверждения этого требуются дополнительные исследования с определением форм нахождения мышьяка. Масса семян в варианте с цеолитом оказалась минимальной (0,42 г) при максимальном количестве семян (112,43 шт.). Это может указывать на перераспределение пластических веществ в пользу количественных репродуктивных признаков в условиях сохраняющегося токсического стресса.

Применение вермикомпоста привело к максимальному увеличению количества стручков (22,35 шт.) и снижению остаточного содержания As в почве на 24,7%. Вместе с тем отмечено увеличение содержания мышьяка в надземной части растений (8,17 мг/кг) по сравнению с вариантом без мелиоранта. Это может быть связано с повышением биодоступности элемента в ризосфере вследствие выделения корневых экссудатов, стимулированного органическим удобрением [9], либо с изменением форм нахождения мышьяка в почве. Для проверки этого предположения необходимы дополнительные исследования.

Наибольшее снижение остаточного содержания мышьяка в почве (на 39,9 %) отмечено в варианте с суспензией *Chlorella vulgaris*. Вместе с тем наблюдалось максимальное содержание As в корнях (50,14 мг/кг) и надземной части (10,30 мг/кг) растений. Коэффициент накопления в этом варианте был наибольшим (10,06). Это указывает на активизацию поглотительной функции корневой системы, что подтверждается максимальной длиной корня (18,48 см). Однако является ли это следствием стимуляции роста корней или изменения проницаемости мембран под действием биопрепарата, требует дополнительного изучения. Высокий коэффициент накопления в варианте с *Chlorella vulgaris* также означает, что значительная часть мышьяка, извлечённого из почвы, концентрируется в растительной биомассе, что следует учитывать при оценке эффективности фиторемедиации.

Значения коэффициента транслокации (K_t) во всех вариантах были ниже 0,3, что свидетельствует о наличии у рапса физиологического барьера, ограничивающего транспорт мышьяка в надземные органы. Это характерно для растений, не являющихся гипераккумуляторами [14]. Наименьшие значения K_t (0,198–0,205) отмечены в вариантах с мышьяком и с суспензией *Chlorella vulgaris*.

Для объективной оценки распределения мышьяка в системе «почва–растение» был рассчитан приблизительный материальный баланс (табл. 5). Исходное количество мышьяка в почве (10 мг/кг) распределялось между тремя основными пулами: остаточное содержание в почве, аккумуляция в растениях и неидентифицированная часть (дефицит баланса).

Таблица 4 - Приблизительный материальный баланс мышьяка в системе «почва–растение»

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.13.4>

Вариант	Исходное содержание As, мг/кг	Остаточное содержание As в почве, мг/кг	Аккумуляция As в растениях, мг/кг	Дефицит баланса, мг/кг	Дефицит баланса, %
Мышьяк	10,00	9,47	0,31	0,22	2,2
Мышьяк + Цеолит	10,00	8,18	0,20	1,62	16,2
Мышьяк + Вермикомпост	10,00	7,53	0,38	2,09	20,9
Мышьяк + Суспензия <i>Chlorella vulgaris</i>	10,00	6,01	0,60	3,39	33,9

Примечание: аккумуляция As в растениях рассчитана на 1 кг почвы с учётом массы растений

Дефицит баланса, составивший от 2,2% (вариант с мышьяком) до 33,9% (вариант с *Chlorella vulgaris*), может быть обусловлен следующими причинами: потерями мышьяка с дренажными водами, сорбцией на стенках сосудов, образованием летучих форм (арсина) в результате микробной трансформации, а также возможными аналитическими погрешностями. Для уточнения баланса необходимы дополнительные исследования с контролем всех путей миграции токсиканта.

Сравнительная оценка эффективности исследуемых мелиорантов позволяет говорить о целесообразности комплексного подхода к фиторемедиации чернозёмов, загрязнённых мышьяком, однако для обоснованных практических рекомендаций требуются дополнительные исследования. Минеральные сорбенты (цеолиты) в условиях проведённого опыта показали наибольшую эффективность в ограничении поступления токсиканта в растения (наименьший Кн = 2,43), органические мелиоранты (вермикомпост) — в стимуляции формирования репродуктивных органов, а микробный препарат (*Chlorella vulgaris*) — в снижении остаточного содержания мышьяка в почве при одновременном увеличении его накопления в растениях. Перспективным направлением дальнейших исследований является изучение комбинированного применения различных типов мелиорантов для достижения синергетического эффекта при фиторемедиации.

Заключение

1. Установлено фитотоксическое действие мышьяка на рапс сорта Надежный 92 в концентрации 10 мг/кг почвы: высота надземной части снижается на 34,2%, длина корня — на 19,1%, количество стручков — на 60,4%, количество семян — на 91,7%.

2. Внесение цеолита (5 г/кг почвы) на фоне мышьякового загрязнения способствует снижению остаточного содержания мышьяка в почве на 18,2% и увеличению высоты растений на 13,2%, длины корня — на 21,7% по сравнению с контролем. Коэффициент накопления в этом варианте наименьший (2,43).

3. Применение вермикомпоста (5 г/кг) обеспечивает максимальное увеличение количества стручков (22,35 шт.) и снижение остаточного содержания мышьяка в почве на 24,7%. Отмечено увеличение содержания мышьяка в надземной части растений.

4. Суспензия *Chlorella vulgaris* на фоне мышьякового загрязнения обеспечивает наибольшее снижение остаточного содержания мышьяка в почве (на 39,9%) и стимулирует развитие корневой системы. Этот эффект сопровождается максимальным накоплением мышьяка в растениях (КН = 10,06).

5. Полученные результаты могут быть использованы для выбора мелиорантов при фиторемедиации чернозёмов, загрязнённых мышьяком, в условиях модельного эксперимента. Для разработки обоснованных практических рекомендаций требуются дополнительные исследования с построением полного материального баланса мышьяка и определением его форм нахождения в почве.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Карасева Е.В. Тяжёлые металлы и металлоиды в почвах техногенных зон: источники, формы нахождения, биодоступность / Е.В. Карасева // Экологическая химия. — 2020. — Т. 29. — № 3. — С. 145–158.
2. Винтоняк В.А. Особенности аккумуляции никеля в органах рапса и горчицы / В.А. Винтоняк, И.С. Попова // Научно-агрономический журнал. — 2025. — № 3 (130). — С. 25–31. — DOI: 10.34736/FNC.2025.130.3.003.25-31.
3. Бускунова Г.Г. Оценка фиторемедиационного потенциала дикорастущих видов трав с целью использования на техногенно загрязнённых почвах горнорудных территорий / Г.Г. Бускунова, Я.Т. Суюндуков // Экология и промышленность России. — 2025. — Т. 29. — № 9. — С. 66–71. — DOI: 10.18412/1816-0395-2025-9-66-71. — EDN: RTPFLM.
4. Cheng F. Soil pollution in ecologically sensitive regions: The role of industrial activities in soil contamination / F. Cheng, J. Liu // Environmental Geochemistry and Health. — 2022. — Vol. 44. — № 2. — P. 617–624. — DOI: 10.1007/s10653-021-01107-2.
5. Мещерякова В.Ю. Перспективы использования различных растений с целью фиторемедиации почв, загрязнённых тяжёлыми металлами / В.Ю. Мещерякова, Н.А. Дьякова, Ю.А. Павлова // Ульяновский медико-биологический журнал. — 2024. — № 3. — С. 139–154. — DOI: 10.34014/2227-1848-2024-3-139-154.
6. Хужжиев С.О. Фиторемедиация почв, загрязнённых тяжёлыми металлами / С.О. Хужжиев, И.З. Бахрамов, А.Ф. Сайфуллаев // Естественные науки. — 2022. — № 2 (7). — С. 37–45. — DOI: 10.54398/1818507X_2022_2_37. — EDN: TXIDAO.



7. Smith D.R. General chemistry of metals, sampling, analytical methods, and speciation / D.R. Smith, J.L. Jones, M.A. Williams // Handbook on the Toxicology of Metals. — Academic Press, 2022. — P. 15–54. — DOI: 10.1016/B978-0-12-822946-0.00007-6.
8. Везенцев А.И. Сорбционная очистка почв от тяжелых металлов / А.И. Везенцев, М.А. Трубицын, Л.Ф. Голдовская-Перистая [и др.] // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. — 2008. — № 3 (43). — С. 172–175.
9. Байназарова Т.Б. Влияние вермикомпоста на трансформацию и транслокацию тяжелых металлов в грунтах и в системе «почва-растение» / Т.Б. Байназарова, А.Д. Акбасова, Г.А. Саинова [и др.] // Почвоведение и агрохимия. 2025. — № 1. — С. 28–38. — DOI: 10.51886/1999-740X_2025_1_28.
10. Шулаев Н.С. Комбинированный метод фиторемедиации и электрообработки для очистки загрязненных территорий нефтяного комплекса / Н.С. Шулаев, Р.Р. Кадыров, В.В. Пряничникова // Записки Горного института. — 2024. — Т. 265. — С. 147–155.
11. Полякова Р.С. Экологическое испытание рапса ярового в условиях Омской области / Р.С. Полякова, Г.Н. Кузнецова // International Agricultural Journal. — 2022. — Т. 65. — № 2. — DOI: 10.55186/25876740_2022_6_2_27.
12. Гладышев В.Б. Мышьяк и его воздействие на живые организмы / В.Б. Гладышев, П.И. Мазуркин // Журнал передовых исследований в области естествознания. — 2022. — № 16. — С. 67–82. — DOI: 10.26160/2572-4347-2022-16-67-82.
13. Кошкин Е.И. Продуктивность и структура урожая ярового рапса (*Brassica napus* L.) при моноэлементном загрязнении почвы тяжелыми металлами / Е.И. Кошкин, И.В. Вагун, В.Т. Воловик // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. — 2012. — № 2. — С. 32–45.
14. Li L. Conservative mechanism through various rapeseed (*Brassica napus* L.) varieties respond to heavy metal (Cadmium, Lead, Arsenic) stress / L. Li, Z. Fan, Q. Gan [et al.] // Frontiers in Plant Science. — 2024. — Vol. 15. — Art. 1521075. — DOI: 10.3389/fpls.2024.1521075.
15. Stanimirova T. Efficiency of Modified Natural Clinoptilolite Tuff for As(III) and As(V) Uptake from Model Polluted Water / T. Stanimirova, I. Karadjova // MDPI AG. — DOI: 10.20944/PREPRINTS202309.0933.V1.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Karaseva Ye.V. Tyazhyolie metalli i metalloidi v pochvakh tekhnogennikh zon: istochniki, formi nakhozhdeniya, biodostupnost [Heavy metals and metalloids in soils of anthropogenic areas: sources, forms of occurrence, bioavailability] / Ye.V. Karaseva // Ekologicheskaya khimiya [Environmental Chemistry]. — 2020. — Vol. 29. — № 3. — P. 145–158. [in Russian]
2. Vintonyak V.A. Osobennosti akkumulyatsii nikelya v organakh rapsa i gorchitsi [Specifics of nickel accumulation in the organs of rapeseed and mustard] / V.A. Vintonyak, I.S. Popova // Nauchno-agronomicheskii zhurnal [Scientific Agronomic Journal]. — 2025. — № 3 (130). — P. 25–31. — DOI: 10.34736/FNC.2025.130.3.003.25-31. [in Russian]
3. Buskunova G.G. Otsenka fitoremediatsionnogo potentsiala dikorastushchikh vidov trav s tselyu ispolzovaniya na tekhnogenno zagryaznennikh pochvakh gornorudnykh territorii [Assessment of the phytoremediation potential of wild herbaceous species for use on anthropogenically contaminated soils in mining areas] / G.G. Buskunova, Ya.T. Suyundukov // Ekologiya i promishlennost Rossii [Ecology and Industry in Russia]. — 2025. — Vol. 29. — № 9. — P. 66–71. — DOI: 10.18412/1816-0395-2025-9-66-71. — EDN: PTPFLM. [in Russian]
4. Cheng F. Soil pollution in ecologically sensitive regions: The role of industrial activities in soil contamination / F. Cheng, J. Liu // Environmental Geochemistry and Health. — 2022. — Vol. 44. — № 2. — P. 617–624. — DOI: 10.1007/s10653-021-01107-2.
5. Meshcheryakova V.Yu. Perspektivi ispolzovaniya razlichnykh rastenii s tselyu fitoremediatsii pochv, zagryaznennikh tyazhelimi metallami [Prospects for the use of various plants for the phytoremediation of soils contaminated with heavy metals] / V.Yu. Meshcheryakova, N.A. Dyakova, Yu.A. Pavlova // Ulyanovskii mediko-biologicheskii zhurnal [Ulyanovsk Medical and Biological Journal]. — 2024. — № 3. — P. 139–154. — DOI: 10.34014/2227-1848-2024-3-139-154. [in Russian]
6. Khuzhzhiev S.O. Fitoremediatsiya pochv, zagryaznyonnykh tyazhyolimi metallami [Phytoremediation of soils contaminated with heavy metals] / S.O. Khuzhzhiev, I.Z. Bakhramov, A.F. Saifullaev // Yestestvennye nauki [Natural Sciences]. — 2022. — № 2 (7). — P. 37–45. — DOI: 10.54398/1818507X_2022_2_37. — EDN: TXIDAO. [in Russian]
7. Smith D.R. General chemistry of metals, sampling, analytical methods, and speciation / D.R. Smith, J.L. Jones, M.A. Williams // Handbook on the Toxicology of Metals. — Academic Press, 2022. — P. 15–54. — DOI: 10.1016/B978-0-12-822946-0.00007-6.
8. Vezentsev A.I. Sorbtionnaya oчитка почв от тяжелых металлов [Sorption-based remediation of soils contaminated with heavy metals] / A.I. Vezentsev, M.A. Trubitsin, L.F. Goldovskaya-Peristaya [et al.] // Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Yestestvennye nauki [Scientific Notes of Belgorod State University. Series: Natural Sciences]. — 2008. — № 3 (43). — P. 172–175. [in Russian]
9. Bainazarova T.B. Vliyanie vermikomposta na transformatsiyu i translokatsiyu tyazhelikh metallov v gruntakh i v sisteme «почва-растение» [The effect of vermicompost on the transformation and translocation of heavy metals in soils and in the 'soil-plant' system] / T.B. Bainazarova, A.D. Akbasova, G.A. Sainova [et al.] // Pochvovedenie i agrokhimiya [Soil Science and Agrochemistry]. 2025. — № 1. — P. 28–38. — DOI: 10.51886/1999-740X_2025_1_28. [in Russian]
10. Shulaev N.S. Kombinirovannii metod fitoremediatsii i elektroobrabotki dlya oчитki zagryaznennikh territorii neftyanogo kompleksa [A combined method of phytoremediation and electro-treatment for the remediation of contaminated sites in the oil industry] / N.S. Shulaev, R.R. Kadirov, V.V. Pryanichnikova // Zapiski Gornogo instituta [Proceedings of the Mining Institute]. — 2024. — Vol. 265. — P. 147–155. [in Russian]



11. Polyakova R.S. Ekologicheskogo ispitanie rapsa yarovogo v usloviyakh Omskoi oblasti [Environmental testing of spring rapeseed in Omsk Oblast] / R.S. Polyakova, G.N. Kuznetsova // International Agricultural Journal. — 2022. — Vol. 65. — № 2. — DOI: 10.55186/25876740_2022_6_2_27. [in Russian]
12. Gladishev V.B. Mishyak i yego vozdeistvie na zhivie organizmi [Arsenic and its effects on living organisms] / V.B. Gladishev, P.I. Mazurkin // Zhurnal peredovikh issledovaniy v oblasti yestestvoznaniya [Journal of Advanced Research in Natural Sciences]. — 2022. — № 16. — P. 67–82. — DOI: 10.26160/2572-4347-2022-16-67-82. [in Russian]
13. Koshkin Ye.I. Produktivnost i struktura urozhaya yarovogo rapsa (*Brassica napus* L.) pri monoelementnom zagryaznenii pochvi tyazhelimi metallami [Yield and yield composition of spring rapeseed (*Brassica napus* L.) under conditions of single-element heavy metal contamination of the soil] / Ye.I. Koshkin, I.V. Vagun, V.T. Volovik // Izvestiya Timiryazevskoi selskokhozyaistvennoi akademii [Proceedings of the Timiryazev Agricultural Academy]. — 2012. — № 2. — P. 32–45. [in Russian]
14. Li L. Conservative mechanism through various rapeseed (*Brassica napus* L.) varieties respond to heavy metal (Cadmium, Lead, Arsenic) stress / L. Li, Z. Fan, Q. Gan [et al.] // Frontiers in Plant Science. — 2024. — Vol. 15. — Art. 1521075. — DOI: 10.3389/fpls.2024.1521075.
15. Stanimirova T. Efficiency of Modified Natural Clinoptilolite Tuff for As(III) and As(V) Uptake from Model Polluted Water / T. Stanimirova, I. Karadjova // MDPI AG. — DOI: 10.20944/PREPRINTS202309.0933.V1.