ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(11):64-74
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 628.164 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_64

АЛГОРИТМ СНИЖЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ СВИНЦА В ГРУНТЕ И ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ НА ТЕРРИТОРИИ СТРОИТЕЛЬСТВА ОБЪЕКТОВ МЕТРОПОЛИТЕНА С ПОМОЩЬЮ БИОЛОГИЧЕСКИХ АГЕНТОВ

Н.Ю. Сарэу

НИТУ МИСИС, Москва, Россия, e-mail: ksareu7777@mail.ru

Аннотация: Исследование, посвященное биоремедиации почвы и подземных вод, загрязненных свинцом, имеет прямое практическое значение для строительства объектов метрополитена, особенно в промышленных и экологически неблагополучных зонах. При строительстве метро нередко приходится сталкиваться с загрязненными грунтами и подземными водами, что требует эффективных и экономичных решений по их очистке. Метод биоремедиации с использованием бактерий Pseudomonas aeruginosa и Rhizobium leguminosarum позволяет: снизить концентрацию свинца в грунтах строительной площадки на 35–50%, снижая токсичность среды для рабочих и техники; улучшить экологическую безопасность строительных работ, особенно при прокладке тоннелей и обустройстве подземных станций в зонах с высоким техногенным загрязнением; сократить затраты по сравнению с традиционными методами очистки, такими как выемка и вывоз загрязненного грунта. Кроме того, технология фиторемедиации в сочетании с Rhizobium leguminosarum может быть использована при рекультивации территорий после завершения строительства, в том числе для создания зеленых зон у станций метро. Таким образом, биоремедиация представляет собой перспективный подход к решению экологических проблем, сопровождающих строительство метрополитена, с потенциалом для масштабного внедрения после соответствующей адаптации и полевых испытаний.

Ключевые слова: биоремедиация, свинец, Pseudomonas aeruginosa, Rhizobium leguminosarum, тяжелые металлы, очистка почвы, подземные воды, экологическая безопасность, фиторемедиация, экономическая эффективность.

Для цитирования: *Сарэу Н. Ю.* Алгоритм снижения концентрации свинца в грунте и подземных водах на территории строительства объектов метрополитена с помощью биологических агентов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 11. – С. 64–74. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_64.

Algorithm of lead concentration reduction in soil and in groundwater on construction sites of subway facilities using biological agents

N.Yu. Sareu

NUST MISIS, Moscow, Russia, e-mail: ksareu7777@mail.ru

Abstract: Investigations concerned with bioremediation of lead-contaminated soil and groundwater has a practical relevance in construction of subway facilities, especially in industrial and environmentally neglected zones. Subway construction is often faced with soil and groundwater pollution, which calls for efficient and economic treatment solutions. Bioremediation using bacteria, in particular, Pseudomonas aeruginosa and Rhizobium leguminosarum, allows: reduction of lead concentration in construction site ground by 35–50% and detoxication of the environment for workers and machines; improvement of ecological safety of construction, especially in tunneling and in infrastructural development of underground stations in high man-made pollution areas; cutting down of expenses as compared with the conventional remediation approaches such as excavation and removal of contaminated soil. Furthermore, phytoremediation using Rhizobium leguminosarum is applicable for the post-construction reclamation, including arrangement of green zones nearby metro stations. In this manner, bioremediation is a promising approach to solving environmental problems accompanying subway construction, with a potential of large-scale introduction after proper adaptation and field trials.

Key words: bioremediation, lead, Pseudomonas aeruginosa, Rhizobium leguminosarum, heavy metals, soil cleanup, groundwater, environmental safety, phytoremediation, economic efficiency.

For citation: Sareu N. Yu. Algorithm of lead concentration reduction in soil and in groundwater on construction sites of subway facilities using biological agents. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(11):64-74. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_64.

Введение

Загрязнение почвы и подземных вод тяжелыми металлами представляет собой одну из самых актуальных проблем для современного общества, особенно в урбанизированных и индустриализированных регионах [1—3]. Свинец (Pb) является одним из таких тяжелых металлов, который активно используется в промышленности и является основным загрязнителем водоемов и почвы. Свинец может попадать в окружающую среду со стройплощадок при строительстве линий метрополитена следующими путями:

• разрушение грунтов и пород — во время бурения и проходки тоннелей вскрываются слои земли, содержащие природные или техногенные загрязнители, включая свинец, который высвобождается и поступает в почву и воду [4—6];

• строительные материалы и оборудование [7] — использование материалов, содержащих свинец (например, краски, герметики, сплавы), а также выхлопы от дизельной техники могут быть источником загрязнения;

• промышленные отходы — на участках, ранее подвергавшихся промышленной эксплуатации, почва может быть уже загрязнена свинцом, который мобилизуется при нарушении целостности грунтов;

• поверхностный сток — дождевая или талая вода смывает загрязнители с поверхности стройплощадки, включая свинец, и переносит их в близлежащие водоемы и подземные горизонты [8—10];

• пылевое загрязнение — при сухих условиях мелкие частицы пыли, содержащие свинец, распространяются ветром за пределы строительной зоны, оседая на почву, растительность и здания.

Все эти механизмы способствуют проникновению свинца в экосистему, что создает риски для здоровья челове-

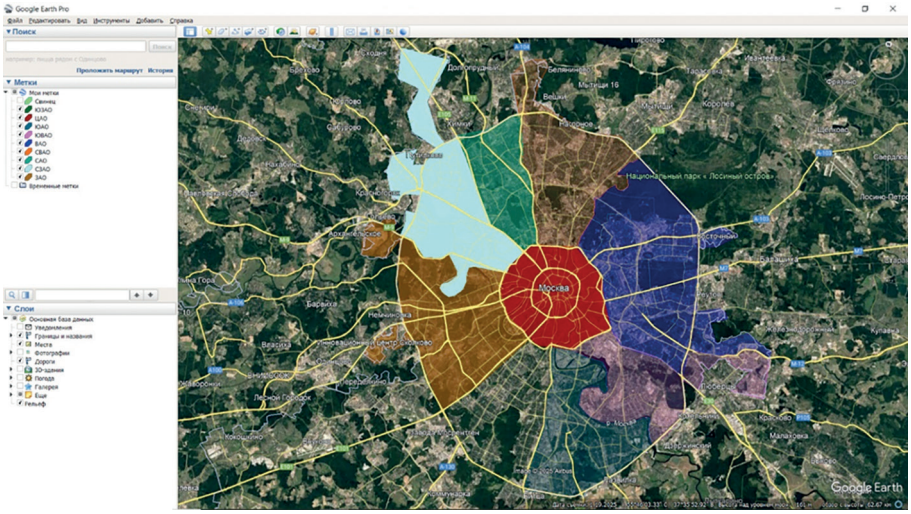


Рис. 1. Схема округов по концентрации свинца в подземных водах
Fig. 1. Diagram of districts by lead concentration in groundwater

ка и окружающей среды [11 — 13]; исходя из этого, проанализировав вышеперечисленную литературу, можно сказать, что традиционные методы очистки от свинца зачастую неэффективны или слишком дороги [14], а потому предлагается использовать биоремидиацию [15, 16] с применением бактерий Pseudomonas aeruginosa и Rhizobium leguminosarum для восстановления загрязненных почв и подземных вод на таких объектах, как стройплощадки метро (рис. 1 и 2).

К тому же он может вызывать мутации в живых организмах и отравления в пищевых цепях. В связи с этим традиционные методы очистки, такие как коагуляция, флотация и др., часто оказываются неэффективными, затратными и экологически небезопасными.

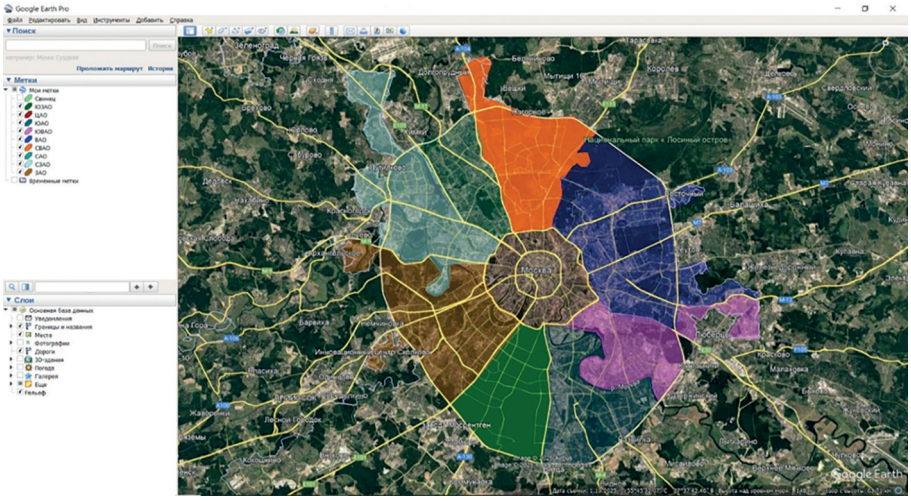


Рис. 2. Схема округов по концентрации свинца в грунте
Fig. 2. The scheme of districts according to the concentration of lead in the soil

Таблица 1

Концентрации тяжелых металлов в пробах почв
Concentrations of heavy metals in soil samples

№	Zn	Pb	Cd	As	Hg	Ni	Cu
Проба № 1	112 – 310	1 – 101	0,14 – 0,92	1,4 – 9,4	0,1 – 0,73	8 – 9	9 – 48
Проба № 2	20 – 249	1 – 82	0,32 – 0,78	2,4 – 12,5	0,08 – 0,55	6 – 33	3 – 99
Проба № 3	20 – 151	20 – 42	0,21 – 0,36	1,2 – 4,8	0,08 – 0,67	9 – 32	23 – 79
Проба № 4	36 – 364	4 – 96	0,01 – 0,92	2,4 – 8,4	0,03 – 0,61	1 – 35	10 – 112
Проба № 5	57 – 274	24 – 66	0,38 – 0,66	0,4 – 6,7	0,11 – 0,53	15 – 35	4 – 76
Проба № 6	5 – 318	2 – 87	0,08 – 0,46	3 – 11	0,07 – 0,73	9 – 30	21 – 101
Проба № 7	13 – 237	16 – 94	0,120,25	1,1 – 8,6	0,05 – 0,47	5 – 34	5 – 47
Проба № 8	29 – 101	1 – 78	0,21 – 0,7	1,1 – 6	0,1 – 0,61	2 – 19	18 – 111
Проба № 9	66 – 94	42 – 98	0,35 – 0,9	5,8 – 9,9	0,05 – 0,44	13 – 26	42 – 95
ПДК (г/м)							
Норма	80	50	1	3	3	30	50

Все это создает необходимость поиска новых и более эффективных методов очистки загрязненных территорий. Биоремедиация — это подход, при котором для очистки экосистем используются микроорганизмы, что является экологически безопасным и экономически выгодным методом. В частности, бактерии Pseudomonas aeruginosa и Rhizobium leguminosarum [17, 18] показывают свою способность к связыванию и удалению свинца из загрязненной почвы и подземных вод, что делает их перспективными кандидатами для биоремедиации. Эти микроорганизмы обладают уникальными свойствами, позволяющими эффективно поглощать и осаждать тяжелые металлы, улучшая тем самым

Таблица 2

Концентраци тяжелых металлов в подземных водах
Concentrations of heavy metals in groundwater

№	Fe	Mn	Cu	Zn	Pb
Проба № 1	0,003 – 0,995	0,053 – 0,992	0,002 – 1,906	0,008 – 1,727	0,002 – 0,973
Проба № 2	0,101 – 0,963	0,08 – 0,765	0,001 – 1,826	0,011 – 1,849	0,001 – 0,907
Проба № 3	0,045 – 0,965	0,076 – 0,859	0,0024 – 1,719	0,01 – 1,905	0,0017 – 0,775
Проба № 4	0,029 – 0,958	0,011 – 0,896	0,009 – 1,515	0,02 – 1,766	0,003 – 0,948
Проба № 5	0,104 – 0,967	0,016 – 0,946	0,0075 – 1,217	0,025 – 1,938	0,003 – 0,849
Проба № 6	0,201 – 0,21	0,06 – 0,943	0,0024 – 1,876	0,01 – 1,886	0,0018 – 0,863
Проба № 7	0,127 – 0,877	0,079 – 0,813	0,0056 – 1,909	0,048 – 1,7	0,17 – 0,967
Проба № 8	0,03 – 0,605	0,07 – 0,984	0,003 – 1,683	0,015 – 2	0,075 – 0,974
Проба № 9	0,087 – 0,75	0,023 – 0,898	0,005 – 1,115	0,01 – 1,908	0,09 – 0,709
ПДК (мг/л)					
Норма	0,3	0,05	1	5	0,03

экосистему, и снижают токсичность загрязняющих веществ [19, 20].

Целью данного исследования является оценка эффективности использования этих бактерий для очистки загрязненных почвы и воды от свинца. Для этого в ряде районов Москвы, в которых велись строительные работы по возведению станций метрополитена, были взяты пробы с интервалом в один месяц, диапазон значений указан в таблицах (табл. 1 и 2).

Методы

В рамках исследования были использованы два типа микроорганизмов: Pseudomonas aeruginosa и Rhizobium leguminosarum. Pseudomonas aeruginosa была выбрана из-за ее способности связывать тяжелые металлы, особенно свинец, с образованием менее токсичных соединений. Она может активно вырабатывать экзополисахариды, которые облегчают связывание ионов металлов, снижая их биодоступность и токсичность. Эта бактерия также способна адаптироваться к различным природным условиям и использовать загрязнители в качестве источников углерода. Rhizobium leguminosarum была выбрана из-за ее способности вступать в симбиотические отношения с бобовыми растениями и фиксировать атмосферный азот, что способствует улучшению качества почвы. Помимо этого, Rhizobium leguminosarum может выделять органические кислоты, которые мобилизуют ионы тяжелых металлов и делают их доступными для дальнейшего удаления (табл. 3 и 4).

В лабораторных экспериментах почвенные образцы с различными концентрациями свинца были окулированы культурами этих бактерий. Также использовалась питательная среда, оптимальная для роста микроорганизмов, а почва подвергалась воздействию при различных значениях pH и температуры, что позволило установить оптимальные условия для работы бактерий. Для контроля были использованы образцы почвы, которые не подвергались биоремедиации. Помимо этого для подтверждения результатов использовались химические методы анализа, такие как атомноабсорбционная спектрометрия, позволяющая точно измерить уровень концентрации свинца в образцах. В экспериментах

Таблица 3

Концентрация свинца в пробах первого месяца
Lead concentration in the samples of the first month

	Первые измерения				Вторые измерения				Среднее значение
Имя	**север**	**юг**	**запад**	**восток**	**север**	**юг**	**запад**	**восток**	
PP	64	72,5	66,5	80,5	18,2	25,5	31,3	25,6	48
RTPBB	69,8	80,3	89,6	56,15	74	38	27,5	34,2	58,7

Таблица 4

Концентрация свинца в пробах второго месяца
Lead concentration in the samples of the second month

	Третьи измерения				Четвертые измерения				Среднее значение
Имя	**север**	**юг**	**запад**	**восток**	**север**	**юг**	**запад**	**восток**	
PP	16,3	21	17,5	18,3	8,4	4,1	11	2,7	12,4
RTPBB	55,1	27,9	46,2	18,2	16,6	6,2	4,5	2	22

Таблица 5

Затраты на очистку 100 кг почвы от свинца
Costs of cleaning 100 kg of soil from lead

Проба	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pseudomonas	80 223	87 597	87 511	84 373	84 650	86 817	86 667	88 090	81 362
Rhizobium	43 717	43 117	44 217	45 842	44 792	54 467	44 492	46 692	45 867

также оценивалась эффективность применения этих бактерий при различных уровнях загрязнения почвы и воды.

Результаты

Результаты экспериментов показали, что оба типа бактерий проявили высокую эффективность в биоремедиации загрязненных свинцом почвы и воды. Pseudomonas aeruginosa продемонстрировала значительное снижение биодоступности свинца в почве, что подтвердилось пониженными уровнями его концентрации в почвенных пробах. При обработке почвы этой бактерией концентрация свинца снизилась на 35—50%, в зависимости от начального уровня загрязнения. Бактерия активно связывала ионы свинца и превращала их в менее токсичные формы, что снижало риск накопления металла в экосистеме. Rhizobium leguminosarum также показала хорошие результаты, однако ее роль в очистке была больше связана с улучшением условий для растений, которые поглощали свинец из почвы. Результаты показали, что Rhizobium leguminosarum в комбинации с растениями может быть эффективным методом фиторемедиации, при котором растения с помощью корневых выделений поглощают и накапливают свинец, значительно снижая его концентрацию в среде. В некоторых экспериментах, в сочетании с растениями, Rhizobium leguminosarum снизила концентрацию свинца на 30—40%. Сравнительный анализ затрат показал, что использование Rhizobium leguminosarum оказалось более экономичным, так как для ее культивирования требовалось

Таблица 6

Сравнение методов очистки
Comparison of cleaning methods

Способы	Затраты на 1 кг
УФ-излучение	765,1
Хлорирование	900,1
Pseudomonas	802,23
Rhizobium	437,17

меньше ресурсов по сравнению с более сложными условиями для выращивания Pseudomonas aeruginosa. Стоимость очистки почвы с использованием Pseudomonas aeruginosa была в 1,5—2 раза выше, но ее эффект был более выраженным при высоких уровнях загрязнения (табл. 5 и 6).

Эти данные свидетельствуют о высокой эффективности и экономической целесообразности применения биоремедиации для очистки загрязненных территорий.

Для реализации метода был разработан алгоритм внесения биологических агентов на строительные площадки, включающий:

- анализ уровня загрязнения тяжелыми металлами;
- подбор и культивирование подходящих штаммов;
- создание оптимальных условий (pH, температура, влажность);
- контроль эффективности очистки методом атомно-абсорбционной спектрометрии.

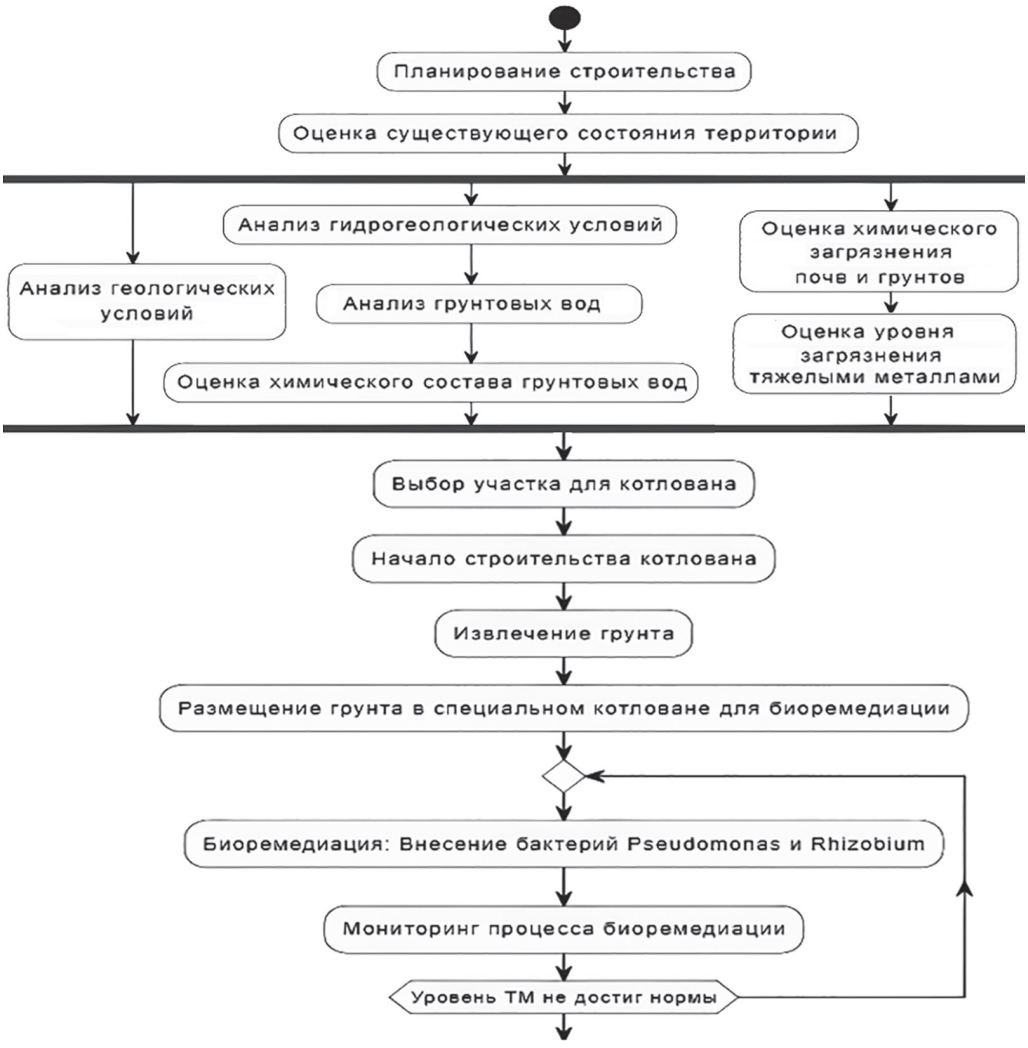
По результатам исследования была разработана блок-схема, в которой описывается процесс рекультивации загрязненных территорий с использованием

методов биоремедиации и фиторемедиации. В ней представлены этапы анализа гидрогеологических и геологических условий, выбора участка, проведения биоремедиации с внесением бактерий, тепловой обработки почвы, фиторемедиации через посев растений, а также рекультивации территории и мониторинга состояния почвы (рис. 3).

Заключение

Проведенные исследования подтвердили высокую эффективность использования бактерий Pseudomonas aeruginosa и Rhizobium leguminosarum для биоремедиации почвы и подземных вод, загрязненных свинцом. Эти микроорганизмы демонстрируют способность значительно снижать концентрацию тяжелого металла, улучшая при этом качество окружающей среды.

Pseudomonas aeruginosa проявила наибольшую активность при высоких уровнях загрязнения, снижая содержание свинца в почве на 35—50% путем его связывания и осаждения в менее токсич-



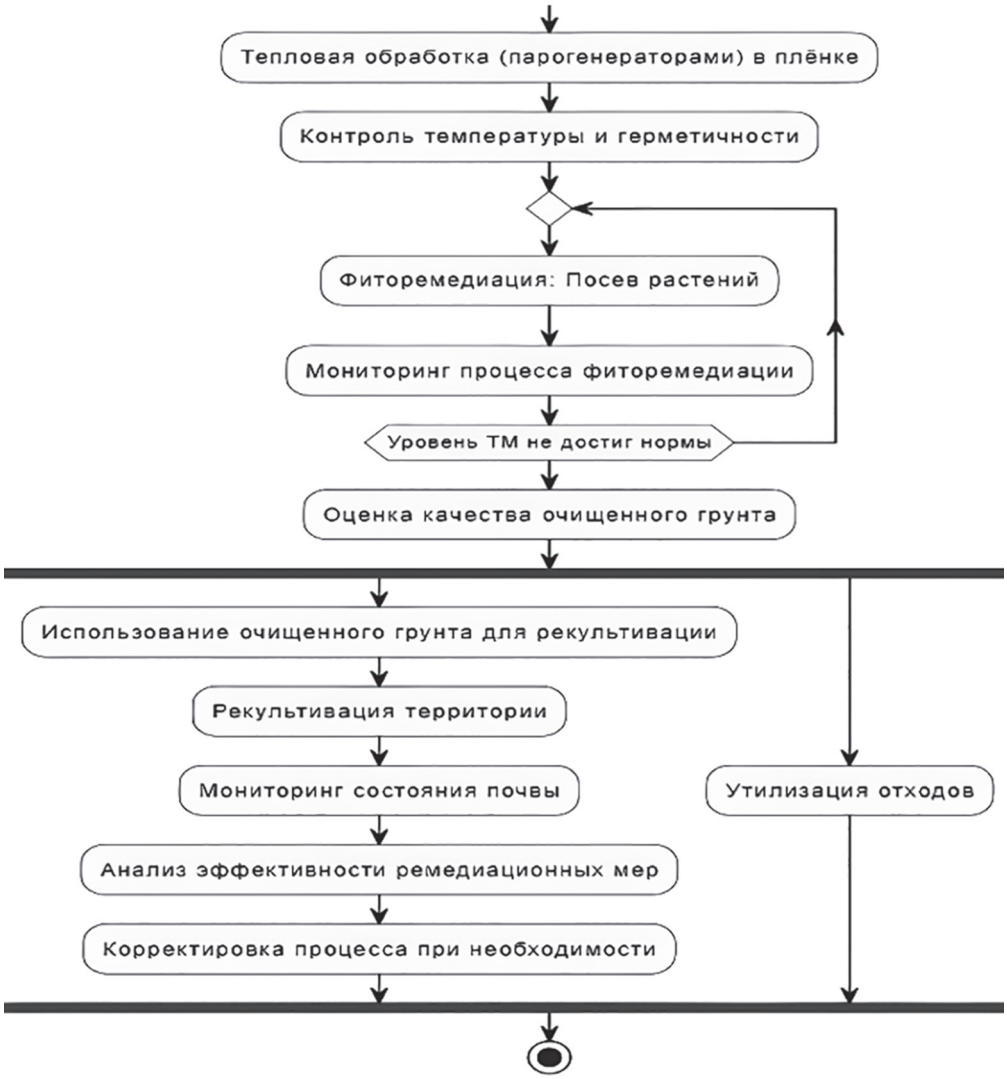


Рис. 3. Алгоритм рекультивации загрязненных территорий при строительстве котлованов
Fig. 3. Algorithm of remediation of polluted territories during the construction of excavation pits

ные формы. Rhizobium leguminosarum, в свою очередь, показала высокую эффективность в рамках фиторемедиации: при взаимодействии с бобовыми растениями формируются симбиотические комплексы, способствующие извлечению свинца через корневую систему и снижению его биодоступности. В комбинации с растениями эффективность очистки достигала 30 — 40%.

Предложенная схема биоремедиации обладает рядом преимуществ:

- экологической безопасностью;
- экономичностью по сравнению с традиционными химическими методами;
- потенциалом для масштабного применения на строительных площадках и промышленно загрязненных территориях.

Тем не менее, для практического внедрения требуется оптимизация условий культивирования бактерий и проведение масштабных полевых испытаний, чтобы подтвердить лабораторные и местные результаты в реальных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Жуков С. А.* Обоснование экологической безопасности при эксплуатации объектов метрополитена с учетом гидрогеологического риска // Горные науки и технологии. — 2024. — Т. 9. — № 3. — С. 283—291. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-04-259.

2. *Patra B., Das M. T., Pradhan S. N., Dash S. R., Bhuyan P. P., Pradhan B.* Ferro-chrome pollution and its consequences on groundwater ecosystems and public health // Limnological Review. 2025, vol. 25, no. 2, article 23. DOI: 10.3390/limnolrev25020023.

3. *Куликова Е. Ю., Баловцев С. В., Скопинцева О. В.* Комплексная оценка геоэкологических рисков при ведении открытых и подземных горных работ // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 205—216. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216.

4. *Yuliani E., Rubiantoro P., Nelvina A., Anggraeni V.* Assessment of groundwater vulnerability to pollution in the metro subwatershed area using the GOD method // Gema Wiralodra. 2024, vol. 15, no. 2, pp. 693—699. DOI: 10.31943/gw.v15i2.687.

5. *Kulikova E. Yu., Ivannikov A. L.* The terms of soils removal from the defects of the underground structures' lining // Journal of Physics: Conference Series. 2020, vol. 1425, no. 1, article 012062. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012062.

6. *Muhammad Farhan Adi Wibowo, Ferryati Masitoh* Assessment of groundwater vulnerability to pollution in the metro hilir watershed using the SINTACS method // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2024, vol. 1406, no. 1, article 012028. DOI: 10.1088/1755-1315/1406/1/012028.

7. *Kulikova E. Yu.* Assessment of operating environment of concrete lining of sewage collector tunnels // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 687, no. 4, article 044035. DOI: 10.1088/1757-899X/687/4/044035.

8. *Сакаева Э., Рудакова Л., Щуклина Л.* Микробиологическая оценка уровня загрязнения почвогрунтов урбанизированных территорий смазочно-охлаждающими жидкостями // Экология и промышленность России. — 2018. — Т. 22. — № 10. — С. 34—37. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-10-34-37.

9. *Mammadli E.* Development of research on groundwater pollution and economic protection during well construction // Journal of Economics. 2025, vol. 2, no. 2, pp. 25—32. DOI: 10.36719/3104-4727/3/25-32.

10. *Сёмин А. Н., Семячков А. И., Почечун В. А., Курдюмов А. В.* Методика оценки экономического ущерба подземным водам при эксплуатации гидротехнических сооружений // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 417—430. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-417-430.

11. *Gao F., Zhao T., Zhu X., Zheng L., Wang W., Zheng X.* Land subsidence characteristics and numerical analysis of the impact on major infrastructure in Ningbo, China // Sustainability. 2023, vol. 15, no. 1, article 543. DOI: 10.3390/su15010543.

12. *Yuan Y., Qin Y., Zhang Y., Xie L., Meng X., Guo Z.* Environmental risk source analysis and classification of zones: Subway construction // Applied Sciences. 2023, vol. 13, no. 10, article 5831. DOI: 10.3390/app13105831.

13. *Kolandhasamy P., Elumalai S., Nandagopal S., Senthil Kumaran S., Rajendran R., Vinayagam R., Ramasamy P.* A preliminary health risk assessment of heavy metal contamination in chembarambakkam lake, Tamil Nadu, South India // Water. 2024, vol. 16, no. 23, article 3517. DOI: 10.3390/w16233517.

14. *Мирзаева Е. И., Исаева Н. Ф., Ялгашев Э. Я., Турдиева Д. П., Боймонов Р. М.* Получение адсорбентов для извлечения тяжелых металлов из сточных вод горнорудной промышленности // Горные науки и технологии. — 2025. — Т. 10. — № 1. — С. 45—55. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-02-224.

15. *Fu L., Dong X., Shen H., Zhu T., Sun F.* River ecosystem health assessment in rapid urbanization regions (Shenzhen, China) under the guidance of bioremediation objectives // Water. 2023, vol. 15, no. 21, article 3859. DOI: 10.3390/w15213859.

16. *Белик Е., Рудакова Л.* Использование биосорбента на основе отхода производства в технологии биоремедиации нефтезагрязненных почв // Экология и промышленность России. — 2015. — Т. 19. — № 7. — С. 20—25. DOI: 10.18412/1816-0395-2015-7-20-25.

17. *Kim K., Oh E., Park S., Jeong J.-P., Jeon S., Lee S., Shin Y., Jung S.* Enhanced rheological and structural properties of the exopolysaccharide from rhizobium leguminosarum VF39 through NTG mutagenesis // Polymers. 2024, vol. 16, no. 22, article 3179. DOI: 10.3390/polym16223179.

18. *Zeng D., Jiao F., Yang Y., Dou S., Yu J., Yu X., Zhou Y., Xue J., Li X., Duan H.* Myricetin potentiates antibiotics against resistant pseudomonas aeruginosa by disrupting biofilm formation and inhibiting motility through FimX-Mediated c-di-GMP signaling interference // Biology. 2025, vol. 14, no. 7, article 859. DOI: 10.3390/biology14070859.

19. *Куликова А. А., Хабарова Е. И.* Использование биологических рабочих агентов для снижения углеродного следа // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 311—321. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-311-321.

20. *Джумагулова Н. Т., Гаврилов И. Е., Нгуен Динь Дап* Изучение видового состава микроорганизмов, осуществляющих очистку сточных вод // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2019. — Т. 330. — № 9. — С. 195—203. DOI: 10.18799/24131830/2019/9/2273. ГИАБ

REFERENCES

1. Zhukov S. A. Substantiation of environmental safety in metro facility operations considering hydrogeological risks. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024, vol. 9, no. 3, pp. 283—291. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-04-259.

2. Patra B., Das M. T., Pradhan S. N., Dash S. R., Bhuyan P. P., Pradhan B. Ferro-chrome pollution and its consequences on groundwater ecosystems and public health. *Limnological Review*. 2025, vol. 25, no. 2, article 23. DOI: 10.3390/limnolrev25020023.

3. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V. Comprehensive assessment of geoecological risks in conducting open and underground mining. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 1, pp. 205—216. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216.

4. Yuliani E., Rubiantoro P., Nelvina A., Anggraeni V. Assessment of groundwater vulnerability to pollution in the metro subwatershed area using the GOD method. *Gema Wiralodra*. 2024, vol. 15, no. 2, pp. 693—699. DOI: 10.31943/gw.v15i2.687.

5. Kulikova E. Yu., Ivannikov A. L. The terms of soils removal from the defects of the underground structures' lining. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, vol. 1425, no. 1, article 012062. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012062.

6. Muhammad Farhan Adi Wibowo, Ferryati Masitoh Assessment of groundwater vulnerability to pollution in the metro hilir watershed using the SINTACS method. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2024, vol. 1406, no. 1, article 012028. DOI: 10.1088/1755-1315/1406/1/012028.

7. Kulikova E. Yu. Assessment of operating environment of concrete lining of sewage collector tunnels. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, vol. 687, no. 4, article 044035. DOI: 10.1088/1757-899X/687/4/044035.

8. Sakaeva E., Rudakova L., Shchuklina L. Microbiological assessment of the level of potting soil contamination in urban areas of metal cutting oils. *Ecology and Industry of Russia*. 2018, vol. 22, no. 10, pp. 34—37. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-10-34-37.

9. Mammadli E. Development of research on groundwater pollution and economic protection during well construction. *Journal of Economics*. 2025, vol. 2, no. 2, pp. 25—32. DOI: 10.36719/3104-4727/3/25-32.

10. Semin A. N., Semyachkov A. I., Pochechun V. A., Kurdyumov A. V. Meth-odology for assessing economic damage to groundwater during hydraulic struc-tures operation. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 2, pp. 417—430. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-417-430.

11. Gao F., Zhao T., Zhu X., Zheng L., Wang W., Zheng X. Land subsidence characteristics and numerical analysis of the impact on major infrastructure in Ningbo, China. *Sustainability*. 2023, vol. 15, no. 1, article 543. DOI: 10.3390/su15010543.

12. Yuan Y., Qin Y., Zhang Y., Xie L., Meng X., Guo Z. Environmental risk source analysis and classification of zones: Subway construction. *Applied Sciences*. 2023, vol. 13, no. 10, article 5831. DOI: 10.3390/app13105831.

13. Kolandhasamy P., Elumalai S., Nandagopal S., Senthil Kumaran S., Rajendran R., Vinayagam R., Ramasamy P. A preliminary health risk assessment of heavy metal contamination in chembarambakkam lake, Tamil Nadu, South India. *Water*. 2024, vol. 16, no. 23, article 3517. DOI: 10.3390/w16233517.

14. Mirzaeva E. I., Isaeva N. F., Yalgashev E. Ya., Turdiyeva D. P., Boymonov R. M. Preparation of adsorbents for the extraction of heavy metals from mining wastewater. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025, vol. 10, no. 1, pp. 45—55. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-02-224.

15. Fu L., Dong X., Shen H., Zhu T., Sun F. River ecosystem health assessment in rapid urbanization regions (Shenzhen, China) under the guidance of bioremediation objectives. *Water*. 2023, vol. 15, no. 21, article 3859. DOI: 10.3390/w15213859.

16. Belik E., Rudakova L. Use of the biosorbent based on the production waste in bioremediation technology of oily soils. *Ecology and Industry of Russia*. 2015, vol. 19, no. 7, pp. 20—25. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2015-7-20-25.

17. Kim K., Oh E., Park S., Jeong J.-P., Jeon S., Lee S., Shin Y., Jung S. Enhanced rheological and structural properties of the exopolysaccharide from rhizobium leguminosarum VF39 through NTG mutagenesis. *Polymers*. 2024, vol. 16, no. 22, article 3179. DOI: 10.3390/polym16223179.

18. Zeng D., Jiao F., Yang Y., Dou S., Yu J., Yu X., Zhou Y., Xue J., Li X., Duan H. Myricetin potentiates antibiotics against resistant pseudomonas aeruginosa by disrupting biofilm formation and inhibiting motility through FimX-Mediated c-di-GMP signaling interference. *Biology*. 2025, vol. 14, no. 7, article 859. DOI: 10.3390/biology14070859.

19. Kulikova A. A., Khabarova E. I. Biological working agents use to reduce the carbon footprint. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 1, pp. 311—321. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-311-321.

20. Dzhumagulova N. T., Gavrilov I. E., Nguyen Dinh Dap. Studying species composition of microorganisms performing wastewater treatment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2019, vol. 330, no. 9, pp. 195—203. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2019/9/2273.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Сарэу Николай Юрьевич — аспирант,
НИТУ МИСИС, e-mail: ksareu7777@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

N. Yu. Sareu, Graduate Student, NUST MISIS,
119049, Moscow, Russia, e-mail: ksareu7777@mail.ru.

Получена редакцией 15.07.2025; получена после рецензии 15.09.2025; принята к печати 10.10.2025.
Received by the editors 15.07.2025; received after the review 15.09.2025; accepted for printing 10.10.2025.