



Научная статья

Оценка химических и санитарных показателей грунтов угольных отвалов юга Кузнецкой котловины

Е.Е. Воробьева*^{id}, Н.В. Фотина^{id}, Л.К. Асякина^{id},
М.А. Осинцева^{id}, А.Ю. Просеков^{id}

Кемеровский государственный университет, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, д. 6

*89515923860k@gmail.com

Поступила в редакцию: 03.06.2022

Доработана: 20.06.2022

Принята к печати: 25.06.2022

Опубликована онлайн: 29.10.2022

DOI: 10.23859/estr-220603

УДК 631.618

Аннотация. Из-за большого количества загрязнений на территории угольных отвалов процессы восстановления почвы протекают медленно. Для проведения ее рекультивации необходимы разработка и использование микробного препарата, подбор которого выполняется на основе оценки биохимических показателей грунтов горных пород и степени ее загрязненности. Материалом для настоящего исследования послужили грунты горных пород, отобранные в трех разных зонах (Ka, Kb, Kc) Корчакольского угольного отвала. Изученные санитарно-химические показатели не превышали ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) / предельно допустимых концентраций (ПДК), кроме нефтепродуктов (в зонах Ka, Kb, Kc превышение в среднем составило 2.2, 1.4, 1.2 раза соответственно). В ходе исследования обнаружена прямая корреляция между содержанием цинка и ферментативной активностью полифенолоксидазы, уровнем никеля и пероксидазы, а также обратная корреляция между концентрациями мышьяка и меди с инвертазой и нитритредуктазой соответственно. Индекс бактерий группы кишечной палочки (БГКП) в разных зонах превосходил нормативные значения в 61 и 171 раз. Несмотря на то, что исследованные санитарные показатели не превышают допустимых уровней, они могут приводить к замедлению роста и развития растений. Таким образом, для качественной рекультивации необходимо вносить в грунты горных пород биопрепараты на основе микроорганизмов, осуществляющих биотрансформацию тяжелых металлов, и ризобактерий.

Ключевые слова: Кемеровская область – Кузбасс, ферментативная активность почв, тяжелые металлы, органические поллютанты, санитарно-биологические показатели, восстановление загрязненных почв, ризобактерии, ремедиация

Введение

Кемеровская область занимает первое место в России по угледобыче (Вылегжанин, 2015). Большая часть всего угля Кузбасса добывается на территории следующих муниципальных районов: Кемеровского, Ленинск-Кузнецкого, Прокопьевского, Междуреченского, Киселевского и Беловского (Манаков и др., 2018). Разработка угольных месторождений, в особенности добыча угля открытым способом, его обогащение и хранение, а также складирование отходов угольной промышленности приводят к истощению плодородных почвенных покровов, росту токсикологических показателей почв (Drozdova et al., 2021; Ismagilov et al., 2018). При разработке угольных отвалов плодородный слой почвы снимается; таким образом на их месте обнажаются грунты горных пород.

Почвенные ферменты способствуют расщеплению сложных органических и неорганических соединений, участвуют в минерализации питательных веществ и их включению в круговорот таких элементов, как углерод (инвертаза, целлюлаза), азот (нитритредуктаза, аспарагиназа, уреазы, протеазы), фосфора (фосфатаза) (Assemien et al., 2019; Fan et al., 2021; Sobat et al., 2021; Yinping et al., 2018). Кроме того, ферменты отвечают за детоксикацию поллютантов (перекиси водорода (каталаза) и сложных органических веществ (пероксидаза, полифенолоксидаза)), а также способствуют ремедиации загрязненных почв (Kaushal et al., 2018; Khosrozadeh et al., 2022; Liu et al., 2021).

Деятельность угледобывающих предприятий приводит к разрушению верхнего слоя почвы и нарушению течения подземных и грунтовых вод, вследствие чего снижается биоразнообразие растений и микроорганизмов (Fan et al., 2021). В дальнейшем уменьшается содержание питательных веществ в почве и ее ферментативная активность, накапливаются патогенные микроорганизмы и токсичные соединения (Nakayama and Tateno, 2021). В частности, низкая ферментативная активность почвы может свидетельствовать о высоких концентрациях различных загрязняющих веществ, в том числе тяжелых металлов и металлоидов, служащих ингибиторами для многих групп ферментов. В результате этого в грунте начинаются процессы деградации, которые приводят к истощению питательных веществ, биоразнообразия растительности и полезных микроорганизмов (Samuel et al., 2017).

Процесс ремедиации почв позволяет восстановить техногенно нарушенные территории для передачи их под лесо- либо сельскохозяйственное пользование. Для выбора способа ремедиации необходима санитарная оценка почвы, позволяющая определить степень ее загрязнения. При этом оцениваются две группы показателей (Mathew et al., 2017):

1. санитарно-химические: содержание тяжелых металлов и металлоидов, ПАУ, фенолов, нефтепродуктов и т.д.^{1,2};
2. санитарно-биологические³:
 - а) санитарно-бактериологические: индекс БГКП, индекс энтерококков, содержание патогенных энтеробактерий рода *Salmonella* и *Shigella*;
 - б) санитарно-эпидемиологические: яйца и личинки гельминтов, цисты кишечных патогенных простейших, личинки и куколки синантропных мух.

Целью исследования являлось изучение химических и санитарных показателей качества грунтов горных пород угольных отвалов юга Кемеровской области – Кузбасса для дальнейшего выбора рационального способа ремедиации техногенно нарушенных ландшафтов.

Материалы и методы

Объектами исследования послужили образцы грунтов горных пород, отобранные с поверхностного слоя внешнего породного отвала ООО «Корчаковский» (К) (Рис. 1). Общая площадь отвала составляет 499 тыс. м², высота достигает 100 м, а крутизна склонов варьируется от 1°–2° до 35°. Отвал характеризуется песчано-глинистыми рыхлыми породами и редкой растительностью; возраст его отдельных участков составляет от 5 до 30 лет. Территория отвала входит в состав темнохвойно-таежной природной зоны, располагается в зоне континентального климата. В указанной местности частично проводилась биологическая рекультивация; также наблюдались очаги самовозгорания.

Отбор образцов грунтов горных пород выполняли в осенний период (ноябрь) 2021г. при отрицательной температуре, до выпадения снега, в соответствии с общепринятыми методиками⁴ (глубина отбора составила 0–20 см). Отбор производили в трех зонах поверхностного слоя Корчаковского угольного отвала в пятикратных повторностях:

- Зона «Ка» (возраст – 5 лет) представляет собой смесь отходов – породы от обогащения углей (не менее 86 %) и вскрышные породы (до 14 %), растительность в данной зоне от-

¹ СанПиН 42-128-4433-87. Санитарные нормы допустимых концентраций химических веществ в почве.

² СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

³ СанПиН 2.1.3684-21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий.

⁴ ГОСТ 17.4.4.02–2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа.



Рис. 1. Снимок со спутника “Google Maps” угольного отвала ООО «Разрез «Корчаковский». K_a , K_b , K_c – зоны отбора проб.

существует. Координаты точки отбора образцов: N 53°42' E 87°25'.

- Зона «Kb» (возраст – 15 лет) подвергается технической рекультивации (засыпка глиной); растительность не отмечена. Координаты точки отбора образцов: N 53°41' E 87°25'.
- Зона «Kc» (возраст – 20 лет) находится на биологическом этапе рекультивации техногенных земель. Здесь высажены деревья (*Pinus sylvestris* L.), кустарники (*Hippophaë rhamnoides* L.) и травянистые растения (*Trifolium pratense* L. и *Melilotus albus* L.); для всех обнаруженных растений характерна небольшая высота. Координаты точки отбора образцов: N 53°41' E 87°24'.

Для образования плодородного слоя почвы необходимо определенное содержание легкодоступного углерода, а также соотношение C/N и окислительно-восстановительный потенциал грунтов, поэтому на первоначальных этапах исследования были выбраны следующие ферменты: инвертаза, нитритредуктаза, пероксидаза, полифенолоксидаза (Антонов и Чмуж, 2016; Кочкина, 2016; Li et al., 2020).

Определение инвертазной активности проводили по методике X. Sun et al. (2021). Для анализа использовали раствор сахарозы (Россия, «Сигма Тек»), ацетатный буфер, медный реактив (5 % $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (Россия, «Югреактив») + р-р 25 г Na_2CO_3 (Россия, «ЛенРеактив»), 25 г сегнетовой соли (Россия, «Сигма Тек»), 20 г NaHCO_3 (Россия, «ЛенРеактив»), 200 г Na_2SO_4 (Россия, «Югреактив») в 1 л дистиллирован-

ной воды, в соотношении 1:25), гидрофосфат натрия (Россия, «Сигма Тек») и молибденовый реактив (1 л 20 % р-ра H_2SO_4 (Россия, «ЛенРеактив») + 5 % р-р молибдата аммония (Россия, «Югреактив»)).

Определение нитритредуктазной активности осуществляли по методике X. Liu et al. (2020). Для проведения исследования использовали карбонат кальция (Россия, «ЛенРеактив»), раствор нитрита натрия (Россия, «Югреактив»), раствор глюкозы (Россия, «Сигма Тек»), дистиллированную воду⁵, алюминиевые квасцы, реактив Грисса (Россия, «ЛенРеактив»).

Определение пероксидазной активности проводили по методике X. Sun et al. (2021). Анализ выполнен с применением раствора гидрохинона (Россия, «Сигма Тек»), раствора пероксида водорода (Россия, «Экос-1»), этилового спирта (Россия, «Кемеровская фармацевтическая фабрика»).

Определение полифенолоксидазной активности осуществляли по методике L. Qianxi. et al. (2022) с использованием раствора гидрохинона (Россия, «Сигма Тек»).

Оптическую плотность всех образцов после термостатирования измеряли на спектрофотометре UNICO мод. 1201 (Россия, «ПроПриборы»).

Анализ литературных источников показал, что основными поллютантами, присутствующими в угле Кемеровской области, являются цинк, медь, никель, мышьяк и ртуть (Журавлева и др., 2015;

⁵ ГОСТ 6709–72. Вода дистиллированная. Технические условия.

Осипова и др., 2015; Фотина и др., 2021). По этой причине данные тяжелые металлы были выбраны для контроля санитарно-химического состояния исследуемого участка. Определение содержания этих веществ проводилось по стандартным методикам^{6, 7, 8}. Кроме того, в соответствии с нормативными документами анализировали присутствие бенз(а)пирена, фенолов и нефтепродуктов^{9, 10, 11}, а также санитарно-бактериологические и эпидемиологические показатели¹².

Все санитарно-химические и санитарно-биологические параметры определяли в трехкратной повторности. Статистическую обработку проводили с помощью пакета программ Statistica for Windows v. 12.0, ("StatSoft, Inc.").

Результаты и обсуждение

Результаты гранулометрического и физико-химического анализов исследуемых грунтов горных пород представлены в Табл. 1 и 2. Обнаружено, что по гранулометрическому составу грунты горных пород зон Ка, Кв, Кс относятся к легкому суглинку, средней глине и тяжелому суглинку соответственно. Грунты зоны Кв обладают слабощелочной реакцией среды (8.6), в то время как грунты зон Ка и Кс имеют значение pH, близкое к нейтральному (7.4 и 7.5 соответственно). Изученные образцы харак-

теризуются низким уровнем влажности, что может говорить о недостаточной способности угольных отвалов удерживать воду. Исследованные образцы характеризовались высокой степенью насыщенности основаниями, поэтому восстанавливаемые почвы не нуждаются в известковании. Во всех образцах наблюдается низкое содержание органического вещества, поэтому для улучшения плодородности при рекультивации потребуются внесение дополнительных источников гуминовых кислот. Кроме того, обнаружено низкое содержание общего азота, кальция и магния, что свидетельствует о необходимости внесения минеральных удобрений.

Поскольку неорганические и органические поллютанты существенно влияют на биохимические показатели почвы, оценка активности ферментов позволяет охарактеризовать состояние почвенного покрова (Даденко и др., 2013). Результаты определения ферментативной активности исследуемых образцов грунтов горных пород представлены в Табл. 3; средние значения этих показателей отображены на Рис. 2–4.

Согласно Рис. 2, инвертазная активность повышается по мере проведения рекультивационных работ: ее среднее значение для грунтов горных пород, отобранных с поверхностного слоя Корчакольского угольного отвала в зоне Кс, практически вдвое превышает тот же показатель для зоны Ка. Это можно объяснить тем, что грунты горных пород зоны Ка содержат небольшое количество полисахаридов, в то время как корневая система растительности в зоне Кс способствует росту их концентрации. Таким образом, можно сделать вывод о том, что аборигенная микрофлора данной территории в качестве источника углерода использует преимущественно полисахариды.

Изучение нитритредуктазной активности грунтов Корчакольского угольного отвала показало, что в зоне Кс указанный параметр в 1.5 раза выше, чем в зоне Ка (Рис. 3). Это может свидетельствовать об увеличенной потребности в азоте, вызванной активной жизнедеятельностью микроорганизмов и растений.

Данные, представленные на Рис. 4, демонстрируют значительное снижение пероксидазной и полифенолоксидазной активностей грунта в зоне Кс по сравнению с зонами Ка и Кв (в 3.5 и 3.2 раза соответственно). Это может быть связано с тем, что в грунтах горных пород от зоны Ка к зоне Кс уменьшается содержание органических поллютантов (Табл. 4), что, в свою очередь, влияет на продуцирование вышеуказанных ферментов. Однако данные загрязнения деградировали не полностью; это можно установить по тому, что в зоне проведения биологического этапа рекультивации все еще отмечается активность ферментов.

Неорганические и органические поллютанты в больших концентрациях оказывают токсическое

⁶ М-МВИ-80-2008. Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложениях методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии.

⁷ МУ 31-11/05. Количественный химический анализ проб почв, тепличных грунтов, сапропелей, илов, донных отложений, твердых отходов. Методика выполнения измерений массовых концентраций цинка, кадмия, свинца, меди, марганца, мышьяка, ртути методом инверсионной вольтамперометрии на анализаторах типа ТА.

⁸ ПНД Ф 16.1:2.2.2.80-2013. Количественный химический анализ почв. Методика измерений массовой доли общей ртути в пробах почв, грунтов, в том числе тепличных, глин и донных отложений атомно-адсорбционным методом с использованием анализатора ртути РА-915М.

⁹ ФР.1.31.2008.01725. Методика выполнения измерений массовой доли бенз(а)пирена в почвах, грунтах и осадках сточных вод методом высокоэффективной хроматографии.

¹⁰ ПНД Ф 16.1:2.3:3.44-05. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой доли летучих фенолов в пробах почв, осадках сточных вод и отходов фотометрическим методом после отгонки с водяным паром.

¹¹ ПНД Ф 16.1:2.2.22-98. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органогенных, органоминеральных почвах и донных отложениях методом ИК-спектроскопии.

¹² СанПиН 2.1.3684-21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий.

Табл. 1. Гранулометрический анализ грунтов поверхностного слоя Корчакольского угольного отвала.

Размер механических частиц, мм	% от общего числа частиц		
	Зона Ка	Зона Кб	Зона Кс
Более 10.0	0	0	0
10.0–5.0	0	0	0
5.0–2.0	0	0	0
2.0–1.0	0	0	0
1.0–0.5	0.4	1.9	0.1
0.5–0.25	0.2	0.2	0.2
0.25–0.1	0.3	0.1	0.3
0.1–0.05	55.4	14.6	10.4
0.05–0.01	22.7	38.7	39.3
0.01–0.002	15.8	27.6	28.4
Менее 0.002	5.2	16.9	21.3

Табл. 2. Физико-химические показатели грунтов поверхностного слоя Корчакольского угольного отвала.

Показатель	Зона		
	Ка	Кб	Кс
рН водной вытяжки	7.4 ± 0.1	8.6 ± 0.1	7.5 ± 0.01
Гигроскопическая влажность, %	2.10 ± 0.09	5.16 ± 0.23	4.34 ± 0.21
Органическое вещество, %	1.15 ± 0.04	3.48 ± 0.15	4.08 ± 0.20
Степень насыщенности основаниями, %	98.40 ± 4.52	99.14 ± 4.85	99.66 ± 4.73
Общий азот, %	0.17 ± 0.01	0.21 ± 0.01	1.2 ± 0.04
Кальций, ммоль/100 г	0.45 ± 0.02	0.58 ± 0.02	0.79 ± 0.02
Магний, ммоль/100 г	0.55 ± 0.02	0.64 ± 0.03	0.99 ± 0.04

действие на растения и микроорганизмы. Следовательно, для конструирования консорциума микроорганизмов, осуществляющего ремедиацию загрязненных участков, необходимо оценивать степень загрязненности. Результаты исследования грунтов Корчакольского угольного отвала по санитарно-химическим показателям представлены в Табл. 4. ОДК/ПДК и средние значения концентраций загрязняющих веществ на изученных территориях приведены на Рис. 5 и 6.

Нами обнаружено, что в грунтах Корчакольского отвала наблюдаются высокие концентрации цинка, меди, никеля, мышьяка (Рис. 5), что согласуется с данными других исследований (Акинина и др., 2017; Фотина и др., 2021). Известно, что повышенное содержание цинка может приводить к замедлению роста растений, вызывать хлороз

листьев (Jain et al., 2020). Это происходит из-за появления Zn-хлорофилла, который не может участвовать в процессе фотосинтеза (Küpper and Andresen, 2016). Высокая концентрация меди негативно влияет на фотосинтезирующую способность, поглощение фосфора из почвы, а также способствует синтезу активных форм кислорода и перекисному окислению липидов в растениях. Это приводит к высокому окислительному стрессу, что может вызвать гибель растения (Angulo-Bejarano et al., 2021). Избыточное количество никеля способно провоцировать снижение прироста биомассы, ингибировать образование боковых корней, нарушать баланс питательных веществ в растении и приводить к хлорозу листьев (Hassan et al., 2019). Наконец, повышенное содержание мышьяка может приводить к уменьшению всхожести и урожай-

Табл. 3. Ферментативная активность грунтов поверхностного слоя Корчакольского угольного отвала (среднее \pm ошибка среднего).

Показатель	Зона					
		Ka		Kb		Kc
Инвертазная активность, мг сахарозы, расщепленной 1 г почвы за 1 ч	Ka ₁	2.197 \pm 0.062	Kb ₁	3.865 \pm 0.102	Kc ₁	4.295 \pm 0.164
	Ka ₂	2.284 \pm 0.074	Kb ₂	4.253 \pm 0.115	Kc ₂	5.218 \pm 0.231
	Ka ₃	2.140 \pm 0.063	Kb ₃	4.154 \pm 0.123	Kc ₃	4.124 \pm 0.185
	Ka ₄	2.161 \pm 0.085	Kb ₄	4.647 \pm 0.098	Kc ₄	5.081 \pm 0.193
	Ka ₅	2.185 \pm 0.053	Kb ₅	3.846 \pm 0.075	Kc ₅	4.768 \pm 0.205
Нитритредуктазная активность, мг восстановленного NO ₂ ⁻ на 1 г почвы за 24 ч	Ka ₁	0.380 \pm 0.012	Kb ₁	1.536 \pm 0.086	Kc ₁	2.378 \pm 0.063
	Ka ₂	0.316 \pm 0.007	Kb ₂	1.974 \pm 0.092	Kc ₂	2.643 \pm 0.086
	Ka ₃	0.410 \pm 0.018	Kb ₃	1.246 \pm 0.066	Kc ₃	2.014 \pm 0.051
	Ka ₄	0.597 \pm 0.025	Kb ₄	2.211 \pm 0.094	Kc ₄	2.936 \pm 0.069
	Ka ₅	0.451 \pm 0.021	Kb ₅	2.675 \pm 0.083	Kc ₅	3.476 \pm 0.094
Пероксидазная активность, мг образовавшегося 1.4–п–бензохинона на 1 г почвы за 30 мин	Ka ₁	1.545 \pm 0.068	Kb ₁	0.856 \pm 0.035	Kc ₁	0.568 \pm 0.014
	Ka ₂	1.427 \pm 0.053	Kb ₂	0.921 \pm 0.029	Kc ₂	0.294 \pm 0.006
	Ka ₃	1.638 \pm 0.077	Kb ₃	1.058 \pm 0.051	Kc ₃	0.316 \pm 0.011
	Ka ₄	1.402 \pm 0.061	Kb ₄	0.716 \pm 0.026	Kc ₄	0.842 \pm 0.023
	Ka ₅	1.430 \pm 0.064	Kb ₅	0.693 \pm 0.034	Kc ₅	0.169 \pm 0.004
Полифенолоксидазная активность, мг образовавшегося 1.4–п–бензохинона на 1 г почвы за 30 мин	Ka ₁	1.101 \pm 0.031	Kb ₁	1.145 \pm 0.046	Kc ₁	0.564 \pm 0.009
	Ka ₂	1.213 \pm 0.048	Kb ₂	0.956 \pm 0.032	Kc ₂	0.429 \pm 0.016
	Ka ₃	1.167 \pm 0.056	Kb ₃	0.843 \pm 0.028	Kc ₃	0.683 \pm 0.017
	Ka ₄	1.054 \pm 0.025	Kb ₄	1.058 \pm 0.041	Kc ₄	0.267 \pm 0.003
	Ka ₅	1.182 \pm 0.057	Kb ₅	0.732 \pm 0.036	Kc ₅	Kc ₅

ности растений, роста побегов, корней и листьев, замедлять процесс фотосинтеза, а также вызывать гибель растений вследствие окислительного стресса (Martins et al., 2019; Zhang et al., 2021). Также отметим, что цинк и мышьяк принадлежат к первому классу опасности; медь и никель – ко второму¹³.

Во всех исследуемых образцах не обнаружилось превышения ПДК бенз(а)пирена (Рис. 6). Содержание нефтепродуктов в исследуемом грунте образца K_a (среднее значение 160.872 мг/кг) превышало фоновый показатель более чем в 2 раза, однако для отвала зоны Kc, подверженной этапу биологической рекультивации, данный параметр практически равен фоновому содержанию (86.544 мг/кг) (Рис. 5).

Количество фенолов в исследуемых образцах не превышало 1 мг/кг (Рис. 6). Фенольное загрязнение почв может быть вызвано как биогенными, так и техногенными факторами. В связи с комплексным характером данного типа загрязнения,

а также с химическим и типологическим разнообразием почв установление ПДК для общего содержания фенолов затруднительно. Согласно литературным данным, при концентрации фенольных веществ от 1 до 5 мг/кг уровень загрязнения интерпретируется как средний (Иеронова и Безухова, 2014). Таким образом, исследуемые грунты горных пород во всех зонах имеют низкий уровень загрязнения фенольными веществами.

Количество ртути в грунтах Корчакольских угольных отвалов не превышало установленной ПДК¹⁴ (Рис. 6), что не противоречит литературным данным (Журавлева и др., 2015). Это связано с воздействием мероприятий по рекультивации, способствующих очистке почв от поллютантов.

С целью выявления связи между содержанием металлов и активностью ферментов были вычислены коэффициенты корреляции (*r*) и значимости (*p*). Коэффициент значимости

¹³ МУ 2.1.7.730-99. Методические указания. Почва, очистка населенных мест, бытовые и промышленные отходы, санитарная охрана почвы. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест.

¹⁴ СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

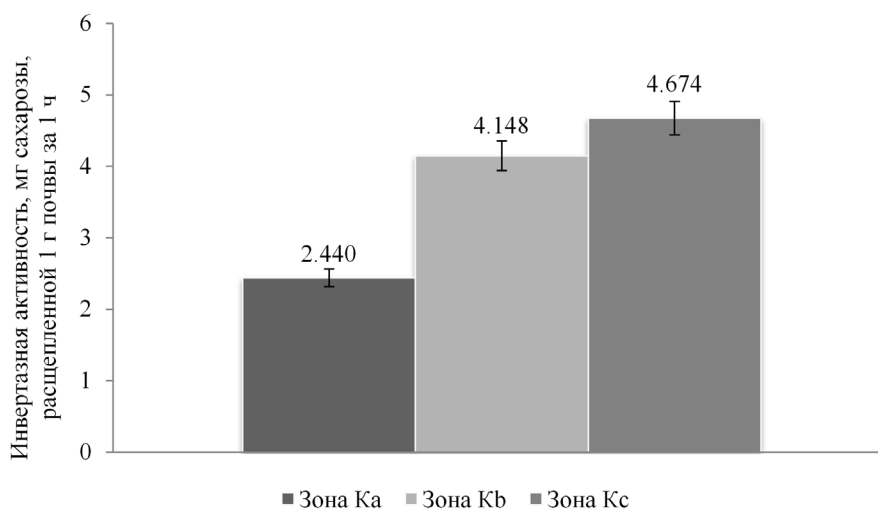


Рис. 2. Инвертазная активность грунтов поверхностного слоя Корчакольского угольного отвала (среднее ± ошибка среднего).

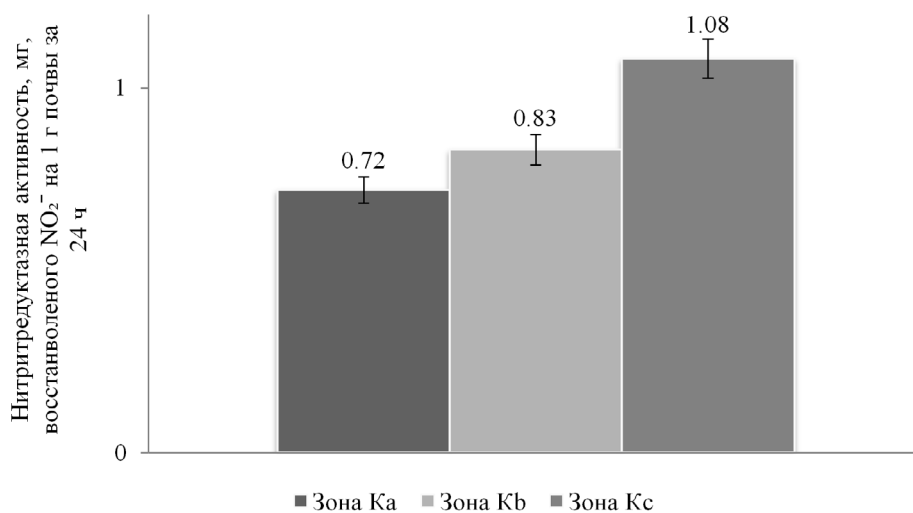


Рис. 3. Нитритредуктазная активность грунтов поверхностного слоя Корчакольского угольного отвала (среднее ± ошибка среднего).

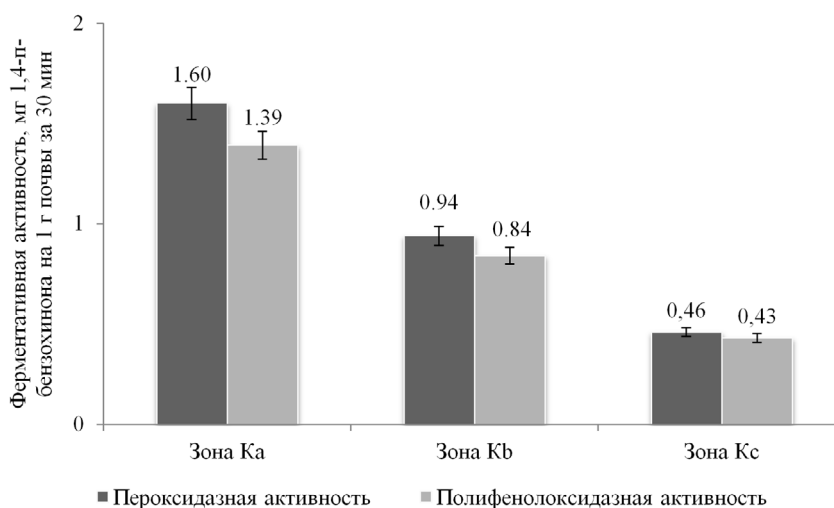


Рис. 4. Peroксидазная и полифенолоксидазная активность грунтов поверхностного слоя Корчакольского угольного отвала (среднее ± ошибка среднего).

Табл. 4. Санитарно-химические показатели грунтов поверхностного слоя Корчакольского угольного отвала; «н/н» – показатель не нормируется.

Показатель	ПДК ¹⁵ / ОДК ¹⁶	Зона					
		Ka		Kb		Kc	
Цинк (валовое содержание), мг/кг	110 ¹⁶	Ka ₁	60.187 ± 2.759	Kb ₁	53.452 ± 2.156	Kc ₁	48.556 ± 1.956
		Ka ₂	61.234 ± 3.015	Kb ₂	52.363 ± 2.349	Kc ₂	47.234 ± 1.894
		Ka ₃	60.568 ± 2.963	Kb ₃	52.951 ± 2.448	Kc ₃	48.191 ± 2.056
		Ka ₄	59.894 ± 2.565	Kb ₄	54.184 ± 2.128	Kc ₄	49.352 ± 2.148
		Ka ₅	60.819 ± 3.003	Kb ₅	53.079 ± 2.356	Kc ₅	47.848 ± 1.920
Медь (валовое содержание), мг/кг	66 ¹⁶	Ka ₁	22.341 ± 0.987	Kb ₁	15.906 ± 0.623	Kc ₁	10.740 ± 0.415
		Ka ₂	22.644 ± 1.004	Kb ₂	15.231 ± 0.587	Kc ₂	10.327 ± 0.276
		Ka ₃	23.104 ± 1.216	Kb ₃	16.361 ± 0.713	Kc ₃	11.167 ± 0.348
		Ka ₄	22.377 ± 0.855	Kb ₄	14.815 ± 0.346	Kc ₄	10.078 ± 0.500
		Ka ₅	22.185 ± 0.783	Kb ₅	14.557 ± 0.469	Kc ₅	9.856 ± 0.281
Никель (валовое содержание), мг/кг	40 ¹⁶	Ka ₁	24.128 ± 1.005	Kb ₁	18.751 ± 0.865	Kc ₁	13.841 ± 0.516
		Ka ₂	24.896 ± 1.225	Kb ₂	19.141 ± 0.921	Kc ₂	14.026 ± 0.631
		Ka ₃	24.314 ± 1.119	Kb ₃	19.759 ± 0.934	Kc ₃	14.338 ± 0.522
		Ka ₄	25.373 ± 1.342	Kb ₄	20.239 ± 0.756	Kc ₄	15.124 ± 0.684
		Ka ₅	24.184 ± 0.989	Kb ₅	20.016 ± 1.005	Kc ₅	14.959 ± 0.348
Мышьяк (валовое содержание), мг/кг	5 ¹⁶	Ka ₁	4.313 ± 0.121	Kb ₁	3.043 ± 0.124	Kc ₁	1.995 ± 0.085
		Ka ₂	4.658 ± 0.203	Kb ₂	3.531 ± 0.110	Kc ₂	2.262 ± 0.114
		Ka ₃	4.066 ± 0.043	Kb ₃	3.919 ± 0.098	Kc ₃	2.738 ± 0.099
		Ka ₄	4.237 ± 0.109	Kb ₄	3.235 ± 0.086	Kc ₄	2.515 ± 0.054
		Ka ₅	4.210 ± 0.098	Kb ₅	4.149 ± 0.146	Kc ₅	3.127 ± 0.123
Ртуть (валовая форма), мг/кг	2.1 ¹⁵	Ka ₁	0.052 ± 0.003	Kb ₁	0.036 ± 0.002	Kc ₁	0.015 ± 0.001
		Ka ₂	0.059 ± 0.002	Kb ₂	0.024 ± 0.001	Kc ₂	0.023 ± 0.001
		Ka ₃	0.065 ± 0.004	Kb ₃	0.041 ± 0.002	Kc ₃	0.018 ± 0.001
		Ka ₄	0.054 ± 0.002	Kb ₄	0.034 ± 0.001	Kc ₄	0.023 ± 0.001
		Ka ₅	0.045 ± 0.002	Kb ₅	0.046 ± 0.001	Kc ₅	0.031 ± 0.002
Бенз(а)пирен, мг/кг	0.02 ¹⁵	Ka ₁	0.020 ± 0.005	Kb ₁	0.014 ± 0.001	Kc ₁	≤0.010
		Ka ₂	0.019 ± 0.006	Kb ₂	0.013 ± 0.001	Kc ₂	
		Ka ₃	0.018 ± 0.002	Kb ₃	0.013 ± 0.001	Kc ₃	
		Ka ₄	0.019 ± 0.007	Kb ₄	0.015 ± 0.001	Kc ₄	
		Ka ₅	0.017 ± 0.005	Kb ₅	0.011 ± 0.001	Kc ₅	
Нефтепродукты, мг/кг	73.6 ¹⁷	Ka ₁	161.234 ± 8.012	Kb ₁	105.349 ± 5.107	Kc ₁	86.348 ± 4.210
		Ka ₂	160.319 ± 7.942	Kb ₂	106.217 ± 4.234	Kc ₂	88.102 ± 3.861
		Ka ₃	161.075 ± 8.105	Kb ₃	104.315 ± 4.751	Kc ₃	86.318 ± 4.105
		Ka ₄	161.237 ± 7.346	Kb ₄	105.284 ± 5.106	Kc ₄	85.294 ± 3.756
		Ka ₅	160.496 ± 7.812	Kb ₅	106.101 ± 5.245	Kc ₅	86.657 ± 4.208
Фенол, мг/кг	н/н	Ka ₁	0.915 ± 0.041	Kb ₁	0.759 ± 0.027	Kc ₁	0.218 ± 0.015
		Ka ₂	0.751 ± 0.036	Kb ₂	0.613 ± 0.021	Kc ₂	0.134 ± 0.009
		Ka ₃	0.824 ± 0.042	Kb ₃	0.598 ± 0.019	Kc ₃	0.259 ± 0.013
		Ka ₄	0.917 ± 0.046	Kb ₄	0.716 ± 0.025	Kc ₄	0.187 ± 0.008
		Ka ₅	0.862 ± 0.035	Kb ₅	0.653 ± 0.026	Kc ₅	0.210 ± 0.016

^{15, 16} СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

¹⁷ Представлено фоновое содержание нефтепродуктов для г. Новокузнецка (Загрязнение..., 2021).

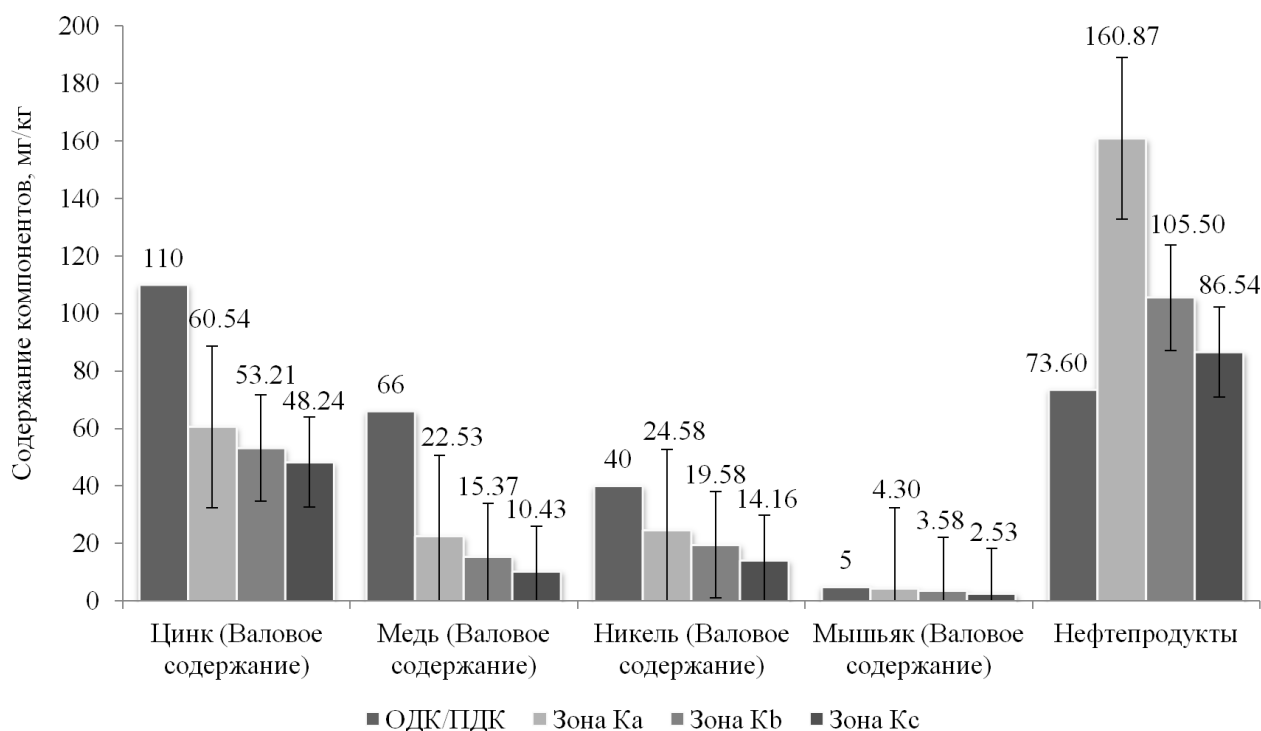


Рис. 5. Содержание тяжелых металлов/металоидов и нефтепродуктов в грунтах горных пород поверхностного слоя Корчакольского угольного отвала (среднее ± ошибка среднего).

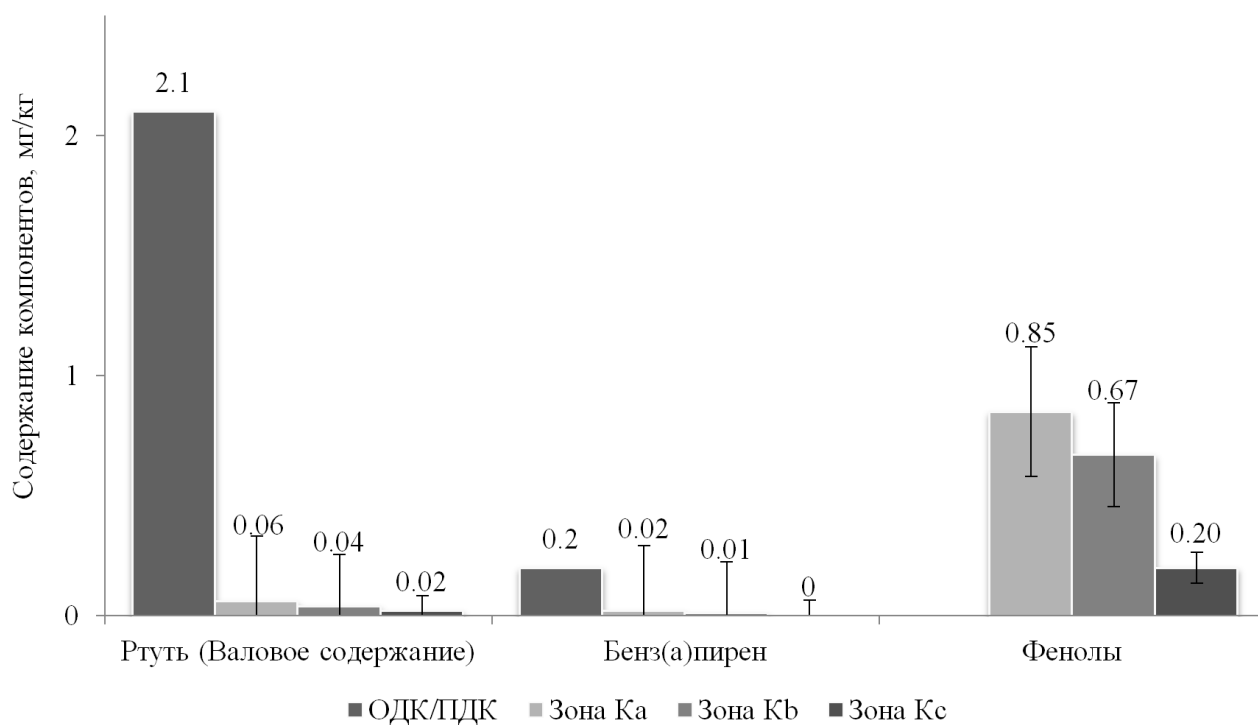


Рис. 6. Содержание ртути, бенз(а)пирена, фенолов в грунтах горных пород поверхностного слоя Корчакольского угольного отвала (среднее ± ошибка среднего).

Табл. 5. Санитарно-биологические показатели грунтов поверхностного слоя Корчакольского угольного отвала; «н/о» – не обнаружено, «н/д» – не допускается.

Показатель	Норма ¹⁸	Зона					
		Ка		Кб		Кс	
Индекс БГКП	1–9	Ка ₁		Кб ₁	643.98 ± 31.50	Кс ₁	1598.54 ± 63.23
		Ка ₂		Кб ₂	453.21 ± 20.28	Кс ₂	1456.29 ± 65.29
		Ка ₃	н/о	Кб ₃	567.30 ± 28.18	Кс ₃	1673.67 ± 82.51
		Ка ₄		Кб ₄	482.49 ± 21.02	Кс ₄	1435.83 ± 69.37
		Ка ₅		Кб ₅	631.25 ± 30.65	Кс ₅	1549.11 ± 65.67
Индекс энтерококков	1–9	Ка ₁		Кб ₁		Кс ₁	
		Ка ₂		Кб ₂		Кс ₂	
		Ка ₃	н/о	Кб ₃	н/о	Кс ₃	н/о
		Ка ₄		Кб ₄		Кс ₄	
		Ка ₅		Кб ₅		Кс ₅	
Патогенные энтеробактерии <i>Salmonella</i> sp. и <i>Shigella</i> sp.	н/д	Ка ₁		Кб ₁		Кс ₁	
		Ка ₂		Кб ₂		Кс ₂	
		Ка ₃	н/о	Кб ₃	н/о	Кс ₃	н/о
		Ка ₄		Кб ₄		Кс ₄	
		Ка ₅		Кб ₅		Кс ₅	
Жизнеспособные яйца и личинки гельминтов	1–9	Ка ₁		Кб		Кс ₁	
		Ка ₂		Кб ₂		Кс ₂	
		Ка ₃	н/о	Кб ₃	н/о	Кс ₃	н/о
		Ка ₄		Кб ₄		Кс ₄	
		Ка ₅		Кб ₅		Кс ₅	
Цисты патогенных простейших	1–9	Ка ₁		Кб ₁		Кс ₁	
		Ка ₂		Кб ₂		Кс ₂	
		Ка ₃	н/о	Кб ₃	н/о	Кс ₃	н/о
		Ка ₄		Кб ₄		Кс ₄	
		Ка ₅		Кб ₅		Кс ₅	
Личинки и куколки синантропных мух	н/д	Ка ₁		Кб ₁		Кс ₁	
		Ка ₂		Кб ₂		Кс ₂	
		Ка ₃	н/о	Кб ₃	н/о	Кс ₃	н/о
		Ка ₄		Кб ₄		Кс ₄	
		Ка ₅		Кб ₅		Кс ₅	

¹⁸ СанПиН 2.1.3684-21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий.

во всех случаях был меньше 0.05. В грунтах поверхностного слоя Корчакольского угольного отвала присутствует высокая прямая зависимость между содержанием цинка и активностью полифенолоксидазы ($r = 0.84$), а также содержанием никеля и активностью пероксидазы ($r = 0.83$). Полученная прямая зависимость противоречит литературным данным (Плешакова и др., 2010; Русяева и др., 2019; Tang et al., 2022) и свидетельствует о возможном присутствии других факторов, нивелирующих действие металлов. К таким факторам могут относиться следующие: количество субстрата, соотношение C/N в почве, pH почвы, состав микробиома, массовая доля гумуса, количество минеральных соединений, влажность (Даденко и др., 2013; Солдатов и др., 2020; Товстик и Олькова, 2021; Xu et al., 2020). В свою очередь, высокая обратная связь наблюдалась между содержаниями меди и нитритредуктазы ($r = -0.92$), а также мышьяка и инвертазы ($r = -0.84$). Подобная зависимость согласуется с данными других исследований (Даденко и др., 2013; Black et al., 2019; Govarthan et al., 2018).

На рост и развитие растений, а также полезной микрофлоры оказывают влияние не только концентрации тяжелых металлов и органических поллютантов, но и санитарно-биологические показатели почвы¹⁹, данные по которым для поверхностного слоя Корчакольского угольного отвала представлены в Табл. 5. Согласно результатам исследований, в пробах отсутствуют энтерококки, патогенные энтеробактерии, яйца и личинки гельминтов (жизнеспособные), цисты патогенных простейших, личинки и куколки синантропных мух. Бактерии группы кишечной палочки (БГКП) в образцах грунтов из зоны Ка также не были обнаружены; при этом в зонах Кб и Кс индекс БГКП превышает норму²⁰ примерно в 61 и 171 раз соответственно. Вероятно, зоны Кб и Кс обладают оптимальными условиями для роста микроорганизмов; в то же время общее санитарно-химическое состояние зоны Ка угнетает развитие естественного микробиома.

Заключение

В направлении от зоны Ка к зоне Кс активность инвертазы и нитритредуктазы возрастала; перок-

сидазная и полифенолоксидазная активности, наоборот, снижались. Это может свидетельствовать о том, что технический и биологический этапы рекультивации положительно влияют на ферментативную активность грунтов горных пород, однако она остается невысокой. Также на данных территориях последовательно уменьшаются значения всех исследованных санитарно-химических показателей; содержание поллютантов не превышает установленных ОДК. Таким образом, можно предположить, что проводимая рекультивация способствует восстановлению антропогенно нарушенных почв. В то же время концентрация загрязняющих веществ остается значительной, и они могут негативно влиять на жизнедеятельность растений, произрастающих на территории угольного отвала, поэтому в дальнейшем потребуются дополнительные меры по очистке почвы от тяжелых металлов.

Статистический анализ биохимических и санитарно-химических показателей грунтов горных пород Корчакольского угольного отвала позволил обнаружить значимую отрицательную корреляцию между содержанием меди и активностью нитритредуктазы; между уровнем мышьяка и инвертазной активностью. В то же время цинк и полифенолоксидаза, а также никель и пероксидаза демонстрируют прямую корреляцию между собой. В дальнейшем планируется исследовать зависимость ферментативной активности данных территорий от количества субстрата (фенола, ароматических соединений, ПАУ и спиртов), состава микробиома, гумуса и количества минеральных соединений. Кроме того, необходимо оценить воздействие тяжелых металлов на микробиом грунтов горных пород. При этом потребуются учитывать продолжительность воздействия поллютантов, так как негативное влияние данных элементов проявляется в долгосрочной перспективе (Иванова и др., 2020).

При исследовании санитарно-бактериологических показателей поверхностного слоя угольного отвала обнаружено, что индекс БГКП в зонах Кб и Кс превышает установленную норму для допустимого уровня загрязнения грунта более чем в 60 раз. Вероятно, эти зоны обладают более благоприятными условиями для развития и жизнедеятельности микробиоты по сравнению с зоной Ка. Также планируется отбор образцов в весенний период для проведения мониторинга состояния отвала²¹.

На данный момент образцы грунтов поверхностного слоя Корчакольского угольного отвала проанализированы по агрофизическим, агрохимическим, биохимическим и санитарным показателям; кроме того, из них были выделены микроор-

¹⁹ МУ 2.1.7.730-99. Методические указания. Почва, очистка населенных мест, бытовые и промышленные отходы, санитарная охрана почвы. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест.

²⁰ СанПиН 2.1.3684-21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий.

²¹ ГОСТ 17.4.4.02–2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа.

ганизмы. На основании полученных результатов и дальнейших исследований планируется отобрать определенные виды растений и микроорганизмов для ремедиации техногенно нарушенных земель. Разрабатывая микробный препарат, в первую очередь следует подбирать наиболее перспективные штаммы, осуществляющие биотрансформацию тяжелых металлов. Это необходимо для увеличения выживаемости культур растений, используемых на биологическом этапе рекультивации (Saha et al., 2021). Особое внимание требуется уделить штаммам, способным нейтрализовать цинк и мышьяк, представляющие наибольшую угрозу на загрязненных территориях²². Также для лучшей выживаемости растений необходимо вносить ризобактерии (Saha et al., 2021) и бактерии-продуценты веществ с антимикробной активностью, способные подавлять жизнедеятельность БГКП для уменьшения риска заражения сельскохозяйственной продукции (Лукин и Марчук, 2011). Таким образом, проведенные и планируемые исследования в перспективе будут использоваться в ходе разработки биопрепарата, наилучшим образом подходящего для ремедиации изученной территории (Третьякова, 2018).

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Разработка подходов к фиторемедиации посттехногенных ландшафтов с использованием стимулирующих рост растений ризобактерий (PGPB) и «омиксных» технологий», дополнительное соглашение № 075-03-2021-189/4 от 30.09.2021 (внутренний номер 075-ГЗ/Х4140/679/4).

ORCID

Е.Е. Воробьева [id 0000-0001-6362-7589](https://orcid.org/0000-0001-6362-7589)

Н.В. Фотина [id 0000-0002-7655-0258](https://orcid.org/0000-0002-7655-0258)

Л.К. Асякина [id 0000-0003-4988-8197](https://orcid.org/0000-0003-4988-8197)

М.А. Осинцева [id 0000-0002-4045-8054](https://orcid.org/0000-0002-4045-8054)

А.Ю. Просеков [id 0000-0002-5630-3196](https://orcid.org/0000-0002-5630-3196)

Список литературы

Акинина, А.Н., Середина, В.П., Овсянникова, С.В., 2017. Экологическое состояние почвенных экосистем Кузнецкой котловины. *Вестник Оренбургского государственного университета* **212** (12), 40–44.

Антонов, Г.И., Чмуж, О.А., 2016. Трансформация биологических свойств почвогрунтов

посттехногенных ландшафтов Бородинского угольного разреза в Рыбинской лесостепи. *Евразийский союз ученых* **22** (1–5), 89–92.

Вылегжанин, В.Н., 2015. Общие соображения анализа ретроспективы Кузбасса. *Горный информационно-аналитический бюллетень* **1**, 152–163.

Даденко, Е.В., Денисова, Т.В., Казеев, К.Ш., Колесников, С.И., 2013. Оценка применимости показателей ферментативной активности в биодиагностике и мониторинге почв. *Поволжский экологический журнал* **4**, 385–393.

Журавлева, Н.В., Ивановкина, О.В., Исмагилов, З.Р., Потокина, Р.Р., 2015. Содержание токсичных элементов во вскрышных и вмещающих породах угольных месторождений Кемеровской области. *Горный информационно-аналитический бюллетень* **3**, 187–196.

Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения в 2020 году, 2021. Сатаева, Л.В. (ред.). НПО «Тайфун», Обнинск, Россия, 128 с.

Иванова, Е.А., Першина, Е.В., Карпова, Д.В., Тхакахова, А.К., Железова, А.Д. и др., 2020. Прокариотные сообщества почвогрунтов отвалов курской магнитной аномалии. *Экологическая генетика* **18** (3), 331–342. <https://doi.org/10.17816/ecogen17901>

Иеронова, В.В., Безухова, А.В., 2014. Оценка экологического состояния почв в зоне нефтегазодобычи по содержанию загрязняющих веществ (на примере нефтяного месторождения Ямало-Ненецкого автономного округа). *Вестник Югорского государственного университета* **34** (3), 38–40.

Кочкина, А.В., 2016. Процессы аммонификации и нитрификации в почве. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки* **4**, 9–14.

Лукин, С.М., Марчук, Е.В., 2011. Влияние биопрепаратов ассоциативных азотфиксирующих микроорганизмов на урожайность сельскохозяйственных культур. *Достижения науки и техники АПК* **8**, 18–21.

Манаков, Ю.А., Куприянов, А.Н., Копытов, А.И., 2108. Добыча каменного угля в Кузбассе в аспекте устойчивого развития региона. *Уголь*

²² МУ 2.1.7.730-99. Методические указания. Почва, очистка населенных мест, бытовые и промышленные отходы, санитарная охрана почвы. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест.

- 110 (9), 89–94. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2018-9-89-94>
- Осипова, Н.А., Язиков, Е.Г., Тарасова, Н.П., Осипов, К.Ю., 2015. Тяжелые металлы в почвах в районах воздействия угольных предприятий и их влияние на здоровье населения. *Безопасность в техносфере* 2, 16–26.
- Плешакова, Е.В., Решетников, М.В., Любунь, Е.В., Беляков, А.Ю., Турковская, О.В., 2010. Биогенная миграция Cd, Pb, Ni и As в системе «почва-растения» и изменение биологической активности почвы. *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле* 10 (2), 59–66.
- Русяева, М.Л., Филончикова, Е.С., Сизенцов, Я.А., 2019. Изучение влияния солей цинка на рост пробиотических, патогенных и условно-патогенных штаммов микроорганизмов. *Научное обозрение. Педагогические науки* 5-2, 79–82.
- Солдатов, В.П., Шапацев, А.К., Казеев, К.Ш., Азаренко, М.А., Колесников, С.И., 2020. Ферментативная активность и содержание гумуса в послелесных почвах Адыгеи. *АгроЭкоИнфо* 41 (3), 17.
- Товстик, Е.В., Олькова, А.С., 2021. Оценка влияния факторов абиотической природы на ферментативную активность почвы. *Экобиотех* 4 (2), 128–134. <https://doi.org/10.31163/2618-964X-2021-4-2-128-134>
- Третьякова, М.С., 2018. Перспективы использования эндо- и ризосферных микроорганизмов для восстановления загрязненных нефтью почв. *Диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук*. Иркутск, Россия, 121 с.
- Фотина, Н.В., Емельяненко, В.П., Воробьева, Е.Е., Бурова, Н.В., Остапова, Е.Т., 2021. Современные биологические методы восстановления и очистки нарушенных угледобычей земель в условиях Кемеровской области – Кузбасса. *Техника и технология пищевых производств* 51 (4), 869–882. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-869-882>
- Angulo-Bejarano, P.I., Puente-Rivera, J., Cruz-Ortega, R., 2021. Metal and metalloid toxicity in plants: an overview on molecular aspects. *Plants* 10, 635–663. <https://doi.org/10.3390/plants10040635>
- Assemien, F.L., Cantarel, A.A., Florio, A., Lerondelle, C., Pommier, T., Gonnety, J.T., Roux, X.L., 2019. Different groups of nitrite-reducers and N₂O-reducers have distinct ecological niches and functional roles in West African cultivated soils. *Soil Biology and Biochemistry* 129, 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.11.003>
- Black, A., Wakelin, S., Hamonts, K., Gerard, E., Condron, L., 2019. Impacts of long term copper exposure on abundance of nitrogen cycling genes and denitrification activity in pasture soils. *Applied Soil Ecology* 138, 253–261. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.03.009>
- Drozdova, M.Y., Pozdnyakova, A.V., Osintseva, M.A., Burova, N.V., Minina, V.I., 2021. The microorganism-plant system for remediation of soil exposed to coal mining. *Foods and Raw Materials* 9 (2), 406–418. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-2-406-418>
- Fan, L., Tarin, M., Yangyang, Z., Yongzhen, H., Rong, J. et al., 2021. Patterns of soil microorganisms and enzymatic activities of various forest types in coastal sandy land. *Global Ecology and Conservation* 28, e01625. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01625>
- Govarthanan, M., Mythili, R., Selvankumar, T., Kamala-Kannan, S., Kim, H., 2018. Myco-phytoremediation of arsenic- and lead-contaminated soils by *Helianthus annuus* and wood rot fungi, *Trichoderma* sp. isolated from decayed wood. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 151, 279–284. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.01.020>
- Hassan, M., Chattha, M., Khan, I., Chattha, M., Aamer, M. et al., 2019. Nickel toxicity in plants: Reasons, toxic effects, tolerance mechanisms, and remediation possibilities – a review. *Environmental Science and Pollution Research* 26, 12673–12688. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04892-x>
- Ismagilov, Z.R., Zhuravleva, N.V., Kerzhentsev, M.A., Yashnik, S.A., Matus, E.V. et al., 2018. Environmental issues in Kuznetsk coal basin. Scientific approaches and technologies to reduce environmental pollution. *Chemistry for Sustainable Development* 26 (3), 221–239. <https://doi.org/10.15372/CSD20180302>
- Jain, D., Kour, R., Bhojija, A.A., Meena, R.H., Singh, A. et al., 2020. Zinc tolerant plant growth promoting bacteria alleviates phytotoxic effects of zinc on maize through zinc immobilization. *Scientific*

- Reports* **10**, 13865. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70846-w>
- Kaushal, J., Mehandia, S., Singh, G., Raina, A., Arya, S., 2018. Catalase enzyme: application in bioremediation and food industry. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* **16**, 192–199. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.07.035>
- Khosrozadeh, S., Guber, A., Kravchenko, A., Ghaderi, N., Blagodatskaya, E., 2022. Soil oxidoreductase zymography: Visualizing spatial distributions of peroxidase and phenol oxidase activities at the root-soil interface. *Soil Biology and Biochemistry* **167**, 108610. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108610>
- Küpper, H., Andresen, E., 2016. Mechanisms of metal toxicity in plants. *Metallomics* **8**, 269–285. <https://doi.org/10.1039/c5mt00244c>
- Li, Z., Zeng, Z., Tian, D., Wang, J., Fu, Z. et al., 2020. The stoichiometry of soil microbial biomass determines metabolic quotient of nitrogen mineralization. *Environmental Research Letters* **15** (3), 034005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6a26>
- Liu, X., Wang, J., Wu, L., Zhang, L., Si, Y., 2021. Impacts of silver nanoparticles on enzymatic activities, nitrifying bacteria, and nitrogen transformation in soil amended with ammonium and nitrate. *Pedosphere* **1** (6), 934–943. [https://doi.org/10.1016/s1002-0160\(21\)60036-x](https://doi.org/10.1016/s1002-0160(21)60036-x)
- Martins, G.C., Oliveira, C., Ribeiro, P.G., Natal-da-Luz, T., Sousa, J.P., Bundschuh, J., Guilherme, L.R.G., 2019. Assessing the Brazilian prevention value for soil arsenic: Effects on emergence and growth of plant species relevant to tropical agroecosystems. *Science of The Total Environment* **694**, 133663. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133663>
- Mathew, B., Singh, H., Biju, V., Beeregowda, K., 2107. Classification, source and effect of environmental pollutants and its biodegradation. *Journal of Environmental Pathology, Toxicology and Oncology* **36** (1), 55–71. <https://doi.org/10.1615/JEnvironPatholToxicolOncol.2017015804>
- Nakayama, M., Tateno, R., 2021. Rhizosphere effects on soil extracellular enzymatic activity and microbial abundance during the low-temperature dormant season in a northern hardwood forest. *Rhizosphere* **21**, 100465. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100465>
- Qianxi, L., Jia, W., Zhang, Q., Cheng, X., 2022. Localized plant-soil-microbe interactions regulate spatial variations of soil oxidase activities within afforested systems in a subtropical area. *Geoderma* **406**, 115499. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115499>
- Saha, L., Tiwari, J., Baudh, K., Ma, Y., 2021. Recent developments in microbe-plant-based bioremediation for tackling heavy metal-polluted soils. *Frontiers in Microbiology* **12**, 731723. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.731723>
- Samuel, A., Brejea, R., Domuta, C., Bungau, S., Cenusa, N., Tit, D.M., 2017. Enzymatic indicators of soil quality. *Journal of Environmental Protection and Ecology* **18** (3), 871–878.
- Sobat, M., Asad, S., Kabiri, M., Mehrshad, M., 2021. Metagenomic discovery and functional validation of L-asparaginases with anti-leukemic effect from the Caspian Sea. *iScience* **24** (1), 101973. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101973>
- Sun, X., Ye, Y., Guan, Q., Jones, D.L., 2021. Organic mulching masks rhizosphere effects on carbon and nitrogen fractions and enzyme activities in urban greening space. *Journal of Soils and Sediments* **21**, 1621–1632. <https://doi.org/10.1007/s11368-021-02900-7>
- Tang, B., Xu, H., Song, F., Ge, H., Yue, S., 2022. Effects of heavy metals on microorganisms and enzymes in soils of lead-zinc tailing ponds. *Environmental Research* **207**, 112174. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112174>
- Xu, Z., Zhang, T., Wang, S., Wang, Z., 2020. Soil pH and C/N ratio determines spatial variations in soil microbial communities and enzymatic activities of the agricultural ecosystems in Northeast China: Jilin Province case. *Applied Soil Ecology* **155**, 103629. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103629>
- Yinping, B., Feng, L., Gang, Y., Shengwei, S., Faqin, D. et al., 2018. Meta-analysis of experimental warming on soil invertase and urease activities. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B. Soil and Plant Science* **68** (2), 104–109. <https://doi.org/10.1080/09064710.2017.1375140>
- Zhang, J., Hamza, A., Xie, Z., Hussain, S., Brestic, M. et al., 2021. Arsenic transport and interaction with plant metabolism: Clues for improving agricultural productivity and food safety. *Environmental Pollution* **290**, 117987. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117987>

Article

Chemical and sanitary assessment of coal spoil heaps in the south of the Kuznetsk Basin

Ekaterina E. Vorobyeva*^{ID}, Natalya V. Fotina^{ID},
Lyudmila K. Asyakina^{ID}, Mariya A. Osintseva^{ID},
Alexandr Yu. Prosekov^{ID}

Kemerovo State University, ul. Krasnaya 6, Kemerovo, 650000 Russia

*89515923860k@gmail.com

Abstract. Due to the large amount of pollution at coal spoil heaps, soil reclamation is slow and requires development and use of microbial preparations, selected based on assessments of the biochemical parameters of soil and the extent of its contamination. The material for this study was mine soils sampled in three different zones (Ka, Kb, Kc) of the Korchakol coal spoil heap. The studied sanitary and chemical indicators did not exceed the approximate permissible concentrations (APC) / maximum allowable concentrations (MAC), except for oil products (in the Ka, Kb, Kc zones, the excess averaged 2.2, 1.4, 1.2 times, respectively). The study found a direct correlation between the zinc content and the enzymatic activity of polyphenol oxidase, the level of Ni and peroxidase, as well as an inverse correlation between the As and Cu concentrations with invertase and nitrite reductase, respectively. The index of bacteria of the *Escherichia coli* group (coliform bacteria) in different zones exceeded the standard values by 61 and 171 times. Even though the sanitary indicators studied do not exceed permissible levels, they can slow down growth and development of plants. Thus, successful reclamation of mine soils requires introduction of biological preparations based on microorganisms that bio-transform heavy metals and rhizobacteria.

Keywords: Kemerovo Region, Kuznetsk Basin, enzymatic activity of soils, heavy metals, organic pollutants, sanitary and biological indicators, reclamation of contaminated soils, rhizobacteria, remediation