



DOI: <https://doi.org/10.23859/estr-250304>

EDN: <https://elibrary.ru/kjyugg>

УДК 631.48

Научная статья

Эколого-химические свойства почв на самозарастающих угольных отвалах лесостепной зоны Западной Сибири

Т.С. Бачурин¹ , Н.В. Митракова^{1*} , И.Н. Госсен² 

¹ *Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614068, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15*

² *Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр-кт ак. Лаврентьева, д. 8/2*

*mitrakovanatalya@mail.ru

Аннотация. Изучены почвы и растительность отвалов угледобычи Кузбасского угольного бассейна, оставленные под самозарастание. Исследование проведено в 2024–2025 гг. На отвалах диагностированы 4 типа почв, представляющих различные стадии почвообразования: эмбриоземы инициальный, органо-аккумулятивный, дерновый и гумусово-аккумулятивный. Проведено морфологическое описание почв, изучен их фракционный состав, актуальная и обменная кислотность, содержание органического вещества, активность каталазы и уреазы, микроэлементный состав. Рассчитан суммарный показатель загрязнения (Z_c) и индекс геологического накопления элементов в почвах (I_{geo}). Выявлено преобладание фракции мелкозема во всех типах эмбриоземов, кроме инициального. Отмечено снижение плотности и щелочности исследуемых почв с развитием растительной группировки. Наблюдалось высокое содержание органического вещества в эмбриоземах из-за включения углистых частиц. Активность каталазы и уреазы увеличивалась по мере развития почвы. Согласно величине Z_c , поверхностные слои (0–10 см) эмбриоземов характеризуются допустимым уровнем загрязнения. I_{geo} показал слабое загрязнение почв свинцом, медью и никелем, а также сильное загрязнение мышьяком.

Ключевые слова: угледобыча, эмбриоземы, растительность, ферменты, тяжелые металлы, индекс геоаккумуляции

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект FSNF-2025-0011) и по государственному заданию ИПА СО РАН.

ORCID:

Т.С. Бачурин, <https://orcid.org/0009-0008-1825-5091>

Н.В. Митракова, <https://orcid.org/0000-0002-5571-7725>

И.Н. Госсен, <https://orcid.org/0000-0002-7324-8061>

Для цитирования: Бачурин, Т.С. и др., 2026. Эколого-химические свойства почв на самозарастающих угольных отвалах лесостепной зоны Западной Сибири. *Трансформация экосистем* 9 (2), 34–53. <https://doi.org/10.23859/estr-250304>

Поступила в редакцию: 04.03.2025

Принята к печати: 14.06.2025

Опубликована онлайн: 17.04.2026

DOI: <https://doi.org/10.23859/estr-250304>

EDN: <https://elibrary.ru/kjyugg>

UDC 631.48

Article

Ecological and chemical properties of soils on self-revegetating coal dumps in the forest-steppe zone of Western Siberia

T.S. Bachurin¹ , N.V. Mitrakova^{1*} , I.N. Gossen² 

¹ Perm State National Research University, Bukireva St. 15, Perm, 614068 Russia

² Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, prospekt Akademika Lavrentieva St. 8/2, Novosibirsk, 630090 Russia

*mitrakovanatalya@mail.ru

Abstract. Soils and vegetation were examined on self-revegetating coal mining dumps in the Kuznetsk Basin (Kuzbass) during the 2024–2025 field seasons. Four soil types representing various stages of pedogenesis were identified: initial embryozems, organo-accumulative embryozems, soddy embryozems, and humus-accumulative embryozems. Morphological descriptions were complemented by analyses of particle-size distribution, actual and exchangeable acidity, organic matter content, catalase and urease activity, and trace element composition. The total pollution index (Zc) and geo-accumulation index (Igeo) were calculated. The fine-earth fraction predominated in all embryozems except the initial stage. Bulk density and alkalinity decreased with the progression of plant community development. Elevated organic matter content in the embryozems was attributed to the incorporation of coal particles. Both catalase and urease activity increased with advancing pedogenesis. Based on Zc values, the surface layer (0–10 cm) of the embryozems fell within the permissible pollution range. The Igeo values indicated slight contamination with lead, copper, and nickel, and strong contamination with arsenic.

Keywords: coal mining, embryozems, vegetation, enzymes, heavy metals, geo-accumulation index

Funding. The work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project FSNF-2025-0011) and on the state assignment of the Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISSA SB RAS).

ORCID:

T.S. Bachurin, <https://orcid.org/0009-0008-1825-5091>

N.V. Mitrakova, <https://orcid.org/0000-0002-5571-7725>

I.N. Gossen, <https://orcid.org/0000-0002-7324-8061>

To cite this article: Bachurin, T.S. et al., 2026. Ecological and chemical properties of soils on self-revegetating coal dumps in the forest-steppe zone of Western Siberia. *Ecosystem Transformation* 9 (2), 34–53. <https://doi.org/10.23859/estr-250304>

Received: 04.03.2025

Accepted: 14.06.2025

Published online: 17.04.2026

Введение

Угледобывающая деятельность оказывает существенное влияние на окружающую среду (Акулов, 2014; Исмаилов и др., 2023; Меркурьев и др., 2021). Учитывая, что уголь является одним из распространенных источников энергии (Singh and Narzary, 2021), добыча его с каждым годом растет. Извлечение угля сопровождается изъятием земель под карьеры и места хранения отходов – отвалы (Брагина, 2016), уничтожением почвенного покрова и загрязнением почв (Зиновьева и др., 2020). Увеличение площади отвалов с низким уровнем биологического разнообразия служит источником дестабилизации состояния окружающей среды (Копытов и Куприянов, 2019). Отмечается, что горение отвалов приводит к повышению уровня содержания полиароматических углеводородов в атмосферном воздухе (Nadudvari et al., 2021).

Снижение негативного воздействия размещения отвалов угледобычи невозможно без рекультивации нарушенных земель, сопровождающейся восстановлением почвенно-растительного покрова. Так, в Китае даже монодоминантное сообщество растений, использованное для рекультивации угольных отвалов, приводит к улучшению свойств почв (Yuan et al., 2018). Растительность рекультивированных отвалов характеризуется выраженным распределением по ярусам, а также разнообразием флористического состава (Калинина и Гермонова, 2018).

Почвенные микроорганизмы первыми реагируют на ухудшение экологических условий (Терехова, 2007). Поэтому активность почвенной микробиоты служит интегральным параметром для оценки восстановления почвенного и растительного покрова. Ферментативная активность почвы непосредственно касается окислительно-восстановительных процессов, превращения углерода и азота, а значит, характеризует функциональное состояние микроорганизмов почвы (Новоселова и Тухватулина, 2009). Снижение значений показателей ферментативной и микробной активности можно считать ранними диагностическими признаками отрицательного воздействия на почву (Wander, 2009).

В Кузбассе в ходе разработки угольных месторождений на поверхность выносятся очень большое количество вскрышных и вмещающих пород, которые становятся почвообразовательными. Эти породы представлены хаотичной смесью песчаника, аргиллита, алевролита и покровных суглинков (Госсен и Беланов, 2011). Породы отвалов, в частности Листвянского углераза, нетоксичны, что способствует самовосстановлению почвенного и растительного покрова (Богуславский и др., 2021). Вещество пород отвалов, свойства пород, климатические условия и экологические особенности территории непосредственно влияют на содержание и распределение микроэлементов за счет мобилизации и привноса элементов с поверхностным стоком и атмосферным переносом. В исследовании Д.Е. Колпаковой и др. (2024) представлены данные о химическом составе почв отвала Барзасского угольного разреза, расположенного в одной природной зоне (лесостепной) с Листвянским разрезом. Образцы Барзасского отвала содержат значительное количество углерода, цирконата стронция и карбоната кальция, селенат кобальта, нитрид молибдена. Исследования грунтов Корчаковского угольного разреза Кемеровской области показали загрязнение цинком, медью, никелем, мышьяком (Воробьева и др., 2023), при этом обнаружена обратная корреляция между содержанием данных элементов и ферментативной активностью. А в почвах рекультивированных отвалов Кизеловского угольного бассейна количество микроэлементов с глубиной увеличивается, что связано с увеличением кислотности почвы за счет сульфидных минералов, содержащихся во вскрышных породах; также отмечается повышенное содержание лития, бора, железа, свинца, мышьяка и селена относительно фона (Перевощикова и др., 2023).

Целью данного исследования является изучение свойств эмбриоземов и определение стадий их развития на самозарастающих угольных отвалах лесостепной зоны Кузбасса. Для достижения цели были описаны морфологические и физические свойства почв, дана характеристика кислотности и содержания органического вещества, проведена оценка эколого-геохимического состояния почв.

Материалы и методы

Описание территории исследования

Кузнецкий угольный бассейн (Кузбасс) расположен в Кемеровской области, в центральной части Евразии в зоне резко континентального климата с заметными и постоянными колебаниями температуры воздуха по временам года (Курачев и Андроханов, 2002). Район исследований находится на границе Кузнецкой котловины и Горной Шории. Кузбасс располагается в центре Евроазиатской литосферной плиты. Значительная часть территории региона относится к Алтае-Саянской складчатой области, а северо-восточная часть – к Западно-Сибирской платформе (Удодов, 2017).

Открытая угледобыча в Кузбассе ведется на месторождениях, обрабатывающих преимущественно отложения балахонской ($C_{2-3} - P_1$) и кольчугинской серий (P_2), представленных переслаиванием пластов углей, песчаников, алевролитов и аргиллитов различной мощности (Кутепов и др., 2021). Кузнецкий угольный бассейн представляет собой крупный синклиорий, заложенный в среднем палеозое (девон) и получивший основное развитие в позднем палеозое (карбон – пермь) (Удодов, 2017).

Район исследования относится к Мариинско-Ачинскому почвенному округу расчлененной лесостепи и лесостепи предгорий с неодинаковой степенью залесенности. Здесь наблюдается оптимальное увлажнение (400–500 мм) в течение всего года и хорошие условия дренажа, что ограничивает формирование почв гидроморфного ряда. Согласно дендрологическому районированию Ю.П. Хлонова (1979) изученная территория относится к Южно-Кузнецкому району сосны и лиственных пород.

Почвообразующие породы представлены карбонатными, светло-бурыми и буровато-желтыми лессовидными иловато-пылеватыми тяжелыми суглинками или пылевато-иловатыми легкими глинами. Почвы территории исследования – серые лесные, а также выщелоченные и оподзоленные черноземы (Трофимов, 1975). Под хвойно-лиственными лесами встречаются дерново-подзолистые, на пониженных участках – луговые, на вершинах холмов – неразвитые черноземовидные каменистые почвы (Беланов и др., 2013).

Объекты исследования

Объектами данного исследования являются почвы самозарастающих и лесорекультивированных участков спланированных отвалов Листвянского угольного разреза (Новокузнецкий р-н, близлежащий населенный пункт (1 км) в западном направлении – с. Михайловка). В настоящее время данное месторождение выработано. Рассмотрен почвенный покров двух отвалов возрастом 10 и 40 лет. На поверхности отвалов сформировался почвенный покров, состоящий из эмбриоземов. Растительность на отвалах представлена мозаично, наблюдаются как травянистые, так и древесно-кустарниковые фитоценозы. Присутствуют участки, лишенные растительного покрова.

Методы исследования

Полевой этап выполнен в летний период 2024 г., камеральная обработка проводилась в 2024–2025 гг. Пробы почв отобраны на трех отвалах разного возраста по трем стенкам прикопки по слоям с глубин 0–5 см, 5–10 см, 10–20 см. В почвенных образцах определена актуальная кислотность (рН водной вытяжки)¹ и обменная кислотность (рН в 3М растворе хлористого калия)². Фракционный состав изучен ситовым методом³, количество органического вещества – методом Тюрина с фотометрическим окончанием⁴. Активность каталазы определена по перманганатному методу Джонсона и Темпле (Хазиев, 1990), активность уреазы – колориметрическим методом Щербакова и Райхинштейна (Хазиев, 1990). Микроэлементный состав установлен методом атомно-эмиссионной спектроскопии индуктивно связанной плазмы на Elan 900⁵. Химический анализ

¹ ГОСТ 26423–85. Межгосударственный стандарт. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки.

² ГОСТ 26483–85. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее рН по методу ЦИНАО.

³ ГОСТ 12536–2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.

⁴ ГОСТ 26213-2021. Почвы. Методы определения органического вещества.

⁵ ГОСТ ISO 22036–14. Качество почвы. Определение микроэлементов в экстрактах почвы с использованием атомно-эмиссионной спектроскопии индуктивно связанной плазмы (ИСП-АЭС).

по определению органического вещества, ферментов и микроэлементов проводился в трехкратной биологической повторности.

Для эколого-геохимической оценки поверхностных слоев почв использовали суммарный показатель загрязнения (Z_c)⁶ и индекс геологического накопления элементов в почвах (индекс геоаккумуляции, I_{geo}). I_{geo} широко применяется для характеристики экологического состояния техногенных почв, так как отвалы угледобычи обогащены металлическими элементами, которые в значительном количестве высвобождаются в ходе естественных процессов выветривания, преимущественно в виде мелких частиц (Chakraborty et al., 2023). Для каждого элемента I_{geo} рассчитывается по следующему уравнению (Ghrefat et al., 2011; Martinez and Poletto, 2014):

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1,5 \times B_n} \right),$$

где C_n – содержание микроэлемента в верхнем горизонте почвы, 1.5 – коэффициент отклонений значений фоновых проб, B_n – содержание микроэлемента в верхнем горизонте фоновой пробы почвы. Коэффициент 1.5 был введен с целью оценки естественных колебаний содержания элемента в окружающей среде с минимальным антропогенным воздействием.

Согласно значениям I_{geo} выделяется 7 уровней загрязнения почв: $I_{geo} < 0$ – чистая; $0 < I_{geo} < 1$ – загрязнение от слабого до среднего; $1 < I_{geo} < 2$ – средняя степень загрязнения; $2 < I_{geo} < 3$ – загрязнение от среднего до сильного; $3 < I_{geo} < 4$ – сильное загрязнение; $4 < I_{geo} < 5$ – загрязнение от сильного до очень сильного; $I_{geo} > 5$ – очень сильное загрязнение.

Для расчета статистических показателей использовалось программное обеспечение Microsoft Excel LTSC MSO (16.0.14332.20714), Past 4.03 и Statistica 4.03. Показатели почв сравнивались дисперсионным непараметрическим методом (критерий Крускала-Уоллиса). Значимые различия между сравниваемыми средними значениями считались с уровнем достоверности 95% и выше ($p < 0.05$). Для анализа связи активности ферментов со свойствами почв использовали регрессионный анализ с доверительной вероятностью 95%.

Результаты и обсуждение

Морфологические свойства почв

Профильно-генетическая классификация почв техногенных ландшафтов, созданная учеными из Новосибирска (Курачев и Андроханов, 2002; Андроханов, 2005), показывает, что основу почвенного покрова Кузбасса составляют 4 типа эмбриозема: инициальный (Эи), органо-аккумулятивный (Эо), дерновый (Эд) и гумусово-аккумулятивный (Эг). Формирование эмбриоземов чаще всего происходит по автоморфному типу почвообразования из-за отсутствия постоянного горизонта почвенно-грунтовых вод, сильной каменистости почвообразующих пород и отсутствия водоупоров при сильном внутриландшафтном дренаже (Андроханов и др., 2004).

Субстрат изученных отвалов состоит из смеси вскрышных и вмещающих пород: аргиллита, алевролита и песчаника.

Участок исследования № 1 (N 53.684575 E 86.897874) расположен на отвале, отсыпка на который прекратилась в 2013–2014 гг. Рельеф участка спланированный, с понижениями и валами высотой до 1 м. В микропонижениях видны промоины и накопления влаги. Почвенный покров представлен эмбриоземом инициальным и эмбриоземом органо-аккумулятивным.

Эмбриозем инициальный (Рис. 1А), отобранный в точке Т13, залегает на участке, окруженном травянисто-древесной растительностью: ивами *Salix* spp., осинкой обыкновенной *Populus tremula* L. и кленом ясенелистным *Acer negundo* L., кустарниками облепихи крушиновидной *Hippophae rhamnoides* L. Доля древесной растительности около 5% от всего проективного покрытия участка. Травянистая растительность состоит из представителей семейств Compositae и Fabaceae: одуванчик обыкновенный *Taraxacum officinale* F.H. Wigg., полынь обыкновенная *Artemisia vulgaris* L., василек синий *Centaurea cyanus* L., клевер луговой *Trifolium pratense* L. Мощность профиля инициального эмбриозема около 20 см, условно его можно разделить на 2 горизонта. С поверхности располагается C_1 (0–7 см) неоднородного темно-серого цвета с включением бурых пятен, уплотненный, бесструктурный, легкосуглинистый, единичны корни травянистых растений, имеют-

⁶ СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

ся включения обломков вскрышных пород (среднего и мелкого размера), каменность до 60%, переход по плотности и крупным каменистым отдельностям. Ниже до 20 см горизонт C_2 – серо-бурого цвета, переуплотненный, бесструктурный, легкосуглинистый, единичны корни травянистых растений, включения обломков вскрышных пород > 10 см, каменность до 80%.

Эмбриозем органо-аккумулятивный (Т14) (Рис. 1В) сформировался под травянистой растительностью, состоящей из представителей семейств Compositae, Fabaceae, Caryophyllaceae и Poaceae: одуванчик обыкновенный, полынь обыкновенная, звездчатка *Stellaria* spp., клевер луговой, люцерна посевная *Medicago sativa* L., мятлик обыкновенный *Poa trivialis* L., костёр безостый *Bromus inermis* Leyss., пырей ползучий *Elytrigia repens* (L.) Desv. ex Nevski, ежа сборная *Dactylis glomerata* L. и др. Мощность профиля эмбриозема органо-аккумулятивного около 30 см, состоит из 3 горизонтов. На поверхности имеется подстилка (A_0) из прошлогоднего опада травянистой растительности слабой и средней степени разложения. Под подстилкой горизонт C_1 (1–6 см) черного цвета (из-за высокого содержания углистых частиц), свежий, рыхлый, бесструктурный, легкосуглинистый, пронизан корнями травянистых растений, включения углистых частиц, граница слабоволнистая, переход по плотности и каменности. Ниже до 25 см горизонт C_2 серого цвета, свежий, переуплотненный, бесструктурный, легкосуглинистый, включения углистых частиц и крупных каменистых отдельностей, единичны корни травянистых растений, каменность до 80%.

Участок исследования № 2 расположен на 40-летнем внутрикарьерном отвале естественного зарастания с уклоном на юг (N 53.662241 E 86.923276). Почвенный покров представлен двумя типами почв: эмбриоземом дерновым и эмбриоземом гумусово-аккумулятивным. Рельеф участка спланированный слабоволнистый.

Эмбриозем дерновый (Т16) (Рис. 1С) представлен на участке, по периметру и единично по центру занятом древесно-кустарниковой растительностью. Древесный ярус (7% от всей растительности) представлен сосной обыкновенной *Pinus sylvestris* L., берёзой повислой *Betula pendula* Roth, осиной обыкновенной. Кустарниковый ярус: облепиха крушиновидная, ивы. Травянистая растительность участка (90% проективного покрытия) представлена разнотравно-злаковой смесью: овсяница луговая *Festuca pratensis* Huds., мятлик обыкновенный, костёр безостый, ежа сборная, тимофеевка луговая *Phleum pratense* L., одуванчик обыкновенный, чина луговая *Lathyrus pratensis* L., бодяк полевой *Cirsium arvense* (L.) Scop., осот полевой *Sonchus arvensis* L.. Мощность профиля эмбриозема дернового около 30 см, условно его можно разделить на 4 горизонта. Подстилка (A_0) сухая, светло-серого цвета, представленная слаборазложившимся опадом травянистой растительности прошлого года и 2–3-летним опадом различной степени разложения. Дернина (A_d) (2–5 см), слой темно-серого цвета, сырой, рыхлый, комковатой структуры, среднесуглинистый, обильно пронизан корнями травянистых растений, граница слабоволнистая,

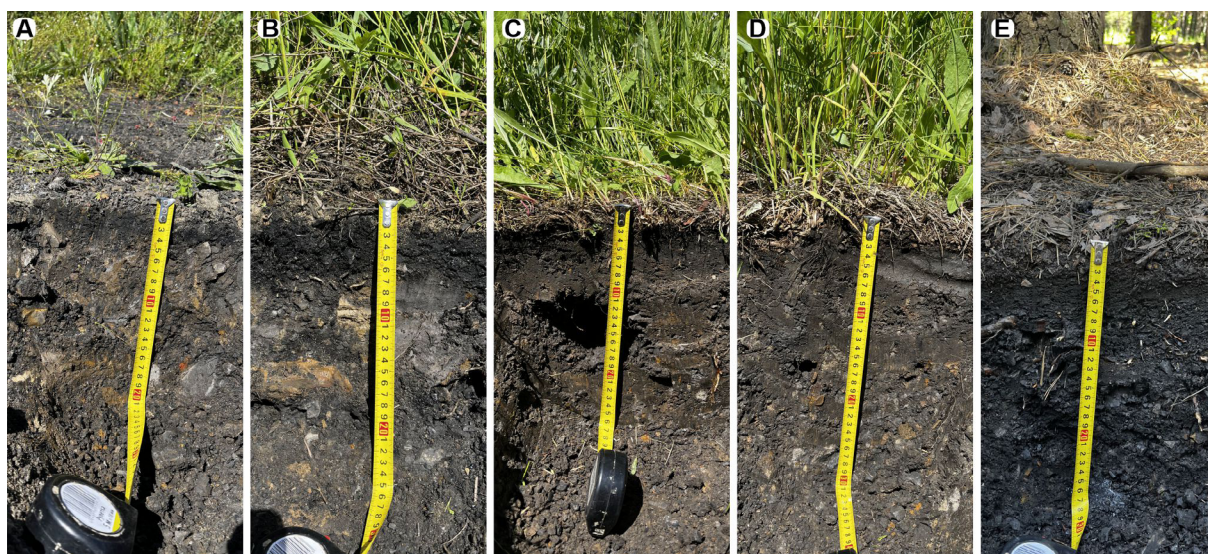


Рис. 1. Профили эмбриоземов: А – инициальный (Т13), В – органо-аккумулятивный (Т14), С – дерновый (Т16), D – гумусово-аккумулятивный (Т15), Е – органо-аккумулятивный (Т17).

переход по плотности, включения каменистых отдельностей. Переходный горизонт AC (5–13 см) представлен смесью вскрышных и вмещающих пород, серого цвета, свежий, плотный, бесструктурный, среднесуглинистый, имеются корни травянистых растений, граница слабоволнистая, переход по плотности и количеству каменистых отдельностей, каменистые отдельности разрушаются при копке, каменистость до 50%. Ниже до 27 см горизонт C (13–27 см) серого цвета, свежий, переуплотненный, бесструктурный, среднесуглинистый, единичные корни травянистых растений, горизонт представлен смесью вскрышных и вмещающих пород, каменистые отдельности разрушаются при копке, каменистость до 80%.

Эмбриозем гумусово-аккумулятивный (Т15) (Рис. 1D) представлен на одном участке с дерновым. Мощность профиля эмбриозема около 30 см, условно его можно разделить на 5 горизонтов. Подстилка (A_0) сухая, светло-серого цвета, представленная слаборазложившимся прошлогодним опадом травянистых растений прошлого года и 2–3-летним опадом средней и высокой степени разложения. Дернина (A_d), слой мощностью 5 см темно-серого цвета, сырой, рыхлый, комковато-зернистой структуры, среднесуглинистый, обильно пронизан корнями травянистых растений. Граница слабоволнистая, переход по количеству корней. Темногумусовый горизонт A_u (5–7 см) темно-серого цвета, сырой, рыхлый, комковато-зернистой структуры, среднесуглинистый, пронизан корнями травянистых растений, единичны включения каменистых отдельностей. Граница слабоволнистая, переход по плотности. Переходный горизонт AC (7–17 см) темно-серого цвета, влажный, уплотненный, слабо выраженной комковатой структуры, среднесуглинистый. Единичны корни травянистых растений. Включения каменистых отдельностей средней степени разложения. Каменистость до 50%. Переход по плотности и количеству каменистых отдельностей. Ниже горизонт C (17–30 см) серого цвета с включением бурых пятен от песчаника, влажный, переуплотненный, бесструктурный, среднесуглинистый, единичны корни травянистых растений. Каменистость слоя около 70%.

Участок № 3 (N 53.394036 E86.553524) находится на отвале с проведением лесной рекультивации – посадкой сосны и облепихи (к настоящему времени практически полностью погибшей) возрастом около 40 лет, на данный момент «мертвопокровный» лес из-за густых насаждений сосны. Рельеф спланированный с микропонижениями. Почвенный покров представлен эмбриоземом органо-аккумулятивным. Эмбриозем органо-аккумулятивный (Т17) (Рис. 1E) расположен под посадкой сосны обыкновенной. Травянистая растительность практически отсутствует, имеются единичные растения земляники лесной *Fragaria vesca* L., чистотела большого *Chelidonium majus* L. В местах выпадения сосны обыкновенной приживаются берёза повислая, осина обыкновенная, рябина обыкновенная *Sorbus aucuparia* L. Мощность профиля эмбриозема около 30 см, условно его можно разделить на 3 горизонта. Подстилка (A_0) светло-серого цвета, представленная хвойным опадом сосны неразложившейся, полуразложившейся и сильно разложившейся степени, в верхней части сухая, внизу влажная. Под подстилкой горизонт C_1 (5–12 см) темно-серого цвета, сырой, плотный, бесструктурный, легкосуглинистый, включения корней древесных растений, каменистых отдельностей и углистых частиц, каменистость 50–60%, переход по количеству крупных каменистых отдельностей, граница слабоволнистая. Ниже горизонт C_2 (12–27 см) темно-серого цвета, сырой, переуплотненный, бесструктурный, легкосуглинистый, включения корней древесных растений, горизонт представлен смесью вскрышных и вмещающих пород, каменистость около 90%.

Свойства почв

Основной почвообразующей породой для развития эмбриоземов является материал отвала, представленный крупными обломками вскрышных и вмещающих пород. С течением времени происходит измельчение обломков и дифференциация профиля почв по содержанию крупных и мелких фракций (Госсен и Беланов, 2011). На современном этапе развития почв в результате процессов выветривания в верхнем слое (0–5 см) во всех типах эмбриоземов, кроме инициального, преобладают фракции мелкозема (Рис. 2). Наибольшее содержание мелкозема и наименьшая плотность характерны для верхних слоев почв вследствие активизации процессов физического и биологического выветривания за счет климатических условий и развития растительности. Плотность эмбриоземов с глубиной увеличивается, как и содержание включений в виде обломков горных пород различных размеров.

Эмбриозем инициальный имеет слабощелочную реакцию по всему профилю ($pH_{вод} = 8.9$), как и нижние слои других эмбриоземов (Рис. 3). Это связано с щелочностью почвообразовательных пород (Брагина и др., 2014) и наличием карбоната кальция в породах отвалов (Колпакова и др., 2024). Актуальная кислотность ($pH_{вод}$) верхних слоев в других типах эмбриоземов указывает на

нейтральную реакцию среды, в ряду эмбриозем органо-аккумулятивный → дерновый → гумусово-аккумулятивный не изменяется и составляет 7.0–7.2. (Рис. 3). Показатели обменной кислотности (pH_{KCl}) уменьшаются по мере развития почв (Рис. 3). Снижение щелочности может быть обусловлено корневыми выделениями растений, которые чаще всего имеют кислую реакцию среды, а также накоплением углекислоты, образующейся при минерализации растительных остатков. Следует отметить, что pH_{KCl} быстрее реагирует на изменения кислотности эмбриоземов при их развитии, чем $pH_{вод}$. Тенденция уменьшения pH почв при их развитии рассмотрена в разновозрастных почвах рекультивированного угольного карьера на месторождении Ранигандж в Индии (Kumar et al, 2015), при этом снижение показателя кислотности объясняется накоплением органического вещества, обменных катионов и мелкой фракции почвы.

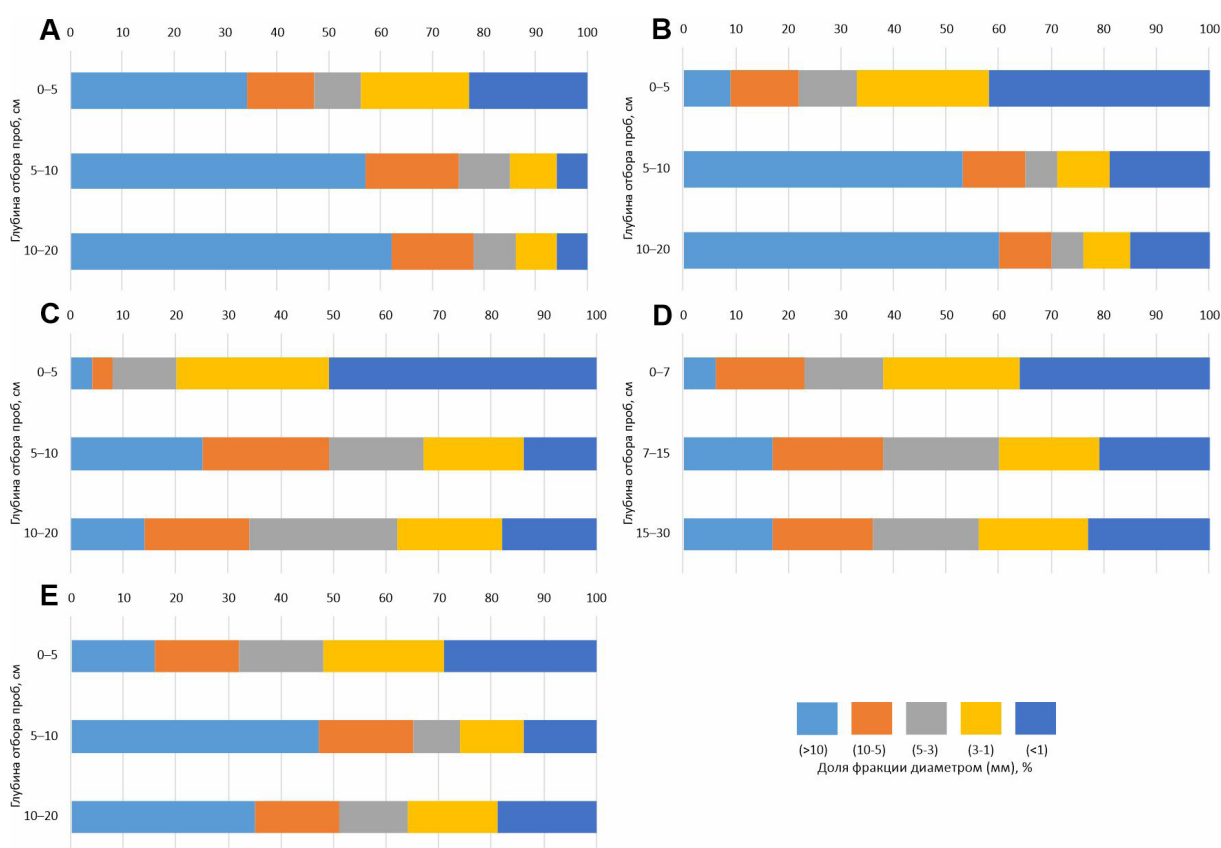


Рис. 2. Фракционный состав эмбриоземов: А – инициальный (Т13), В – органо-аккумулятивный (Т14), С – дерновый (Т16), Д – гумусово-аккумулятивный (Т15), Е – органо-аккумулятивный (Т17).

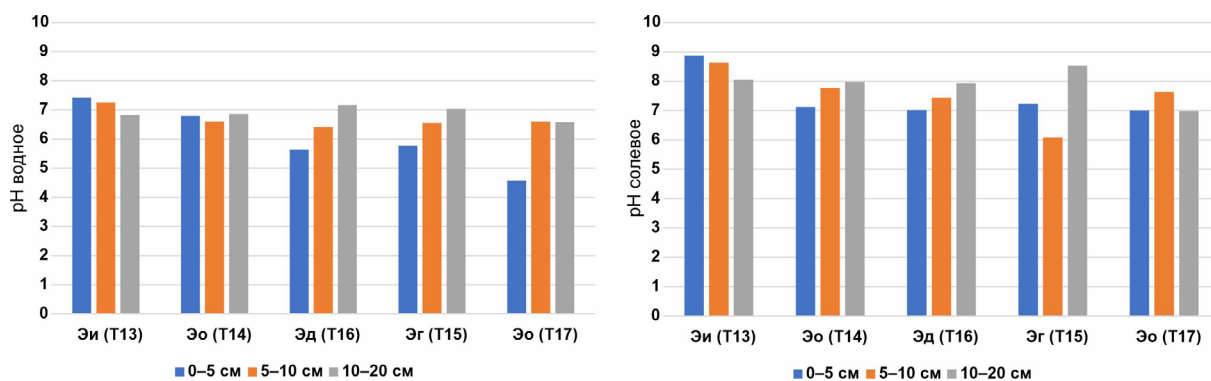


Рис. 3. Кислотность эмбриоземов (для Т15 глубина отбора проб: 0–7, 7–15, 15–30 см).

Содержание органического вещества (ОВ) в эмбриоземах очень высокое, достигает 28% (Рис. 4) и в несколько раз уменьшается с глубиной. Выявленное содержание ОВ в эмбриоземах связано с наличием углистых частиц. Так, минералогический анализ почв угольных отвалов выявил наличие высокого количества углерода (Колпакова и др., 2024). Количество ОВ в эмбриоземах также превышает величины, характерные для фоновых почв (Середина и др., 2012). Максимальное количество ОВ характерно для верхних слоев эмбриозема инициального (Т13) и органо-аккумулятивного (Т14) участка № 1 (Рис. 4). В верхней части профиля эмбриозема дернового (Т16) и гумусово-аккумулятивного (Т15) на участке № 2 выделяются горизонты аккумуляции органического вещества A_d и A_u (Рис. 1C, D). Однако, как отмечалось ранее, столь высокие значения (12–14%) свидетельствуют о неоднородности субстрата и содержании углистых частиц в профиле исследуемых почв. Эмбриозем органо-аккумулятивный на участке № 3 содержит от 9 до 12% органического вещества (Рис. 4), при этом его максимальное количество наблюдается в верхнем слое.

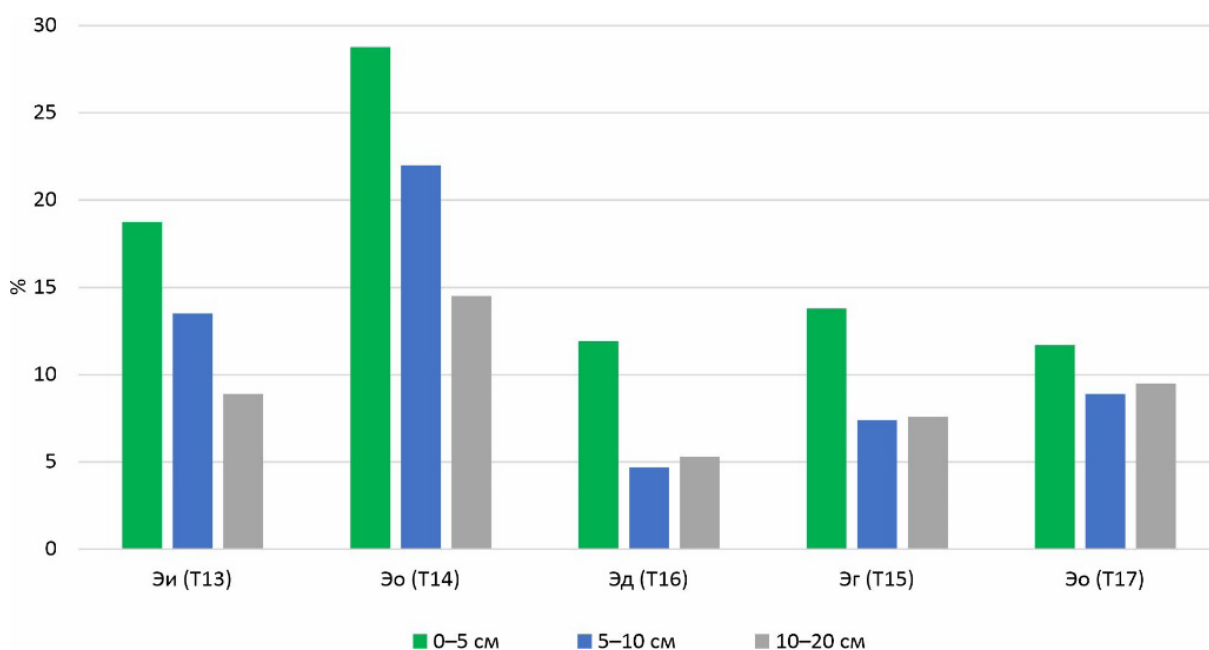


Рис. 4. Содержание органического вещества в исследуемых почвах.

Почвообразовательный процесс протекает при участии ферментов, увеличивающих скорость биохимических реакций (Середина и др., 2012). Известно, что в процессе почвообразования в каждом типе почв формируется определенный уровень и соотношение активности ферментов, что напрямую влияет на интенсивность и направленность почвенных биохимических процессов (Хазиев, 1982; Евдокимова и Калмыкова, 2008). Почвенные ферменты участвуют в биогеохимическом круговороте углерода, азота и фосфора, что позволяет использовать их в качестве ранних чувствительных индикаторов изменений в почве (Liu et al., 2021).

Каталаза участвует в окислительно-восстановительных процессах, которые лежат в основе синтеза гумусовых веществ (Зинченко, 2021), а также участвует в расщеплении перекиси водорода до кислорода и воды. Каталаза является чувствительным ферментом к изменению почвенных условий: температуры, кислотности, аэрации (Новоселова и Волкова, 2017). Уреаза способствует разложению мочевины до аммиака и диоксида углерода, которые не улетучиваются в полной мере, а приводят к образованию преимущественно гидрокарбоната аммония (Гиззатова и Шипаева, 2016). Продукт гидролиза мочевины – аммиак – служит непосредственным источником азотного питания для высших растений (Зинченко и Зинченко, 2020).

В исследуемых почвах более высокая активность каталазы (АК) отмечена под развитым травянистым сообществом на участках эмбриозема дернового и гумусово-аккумулятивного (Рис. 5). Рост активности каталазы с развитием органогенного слоя и гумуса, судя по всему, связан с уве-

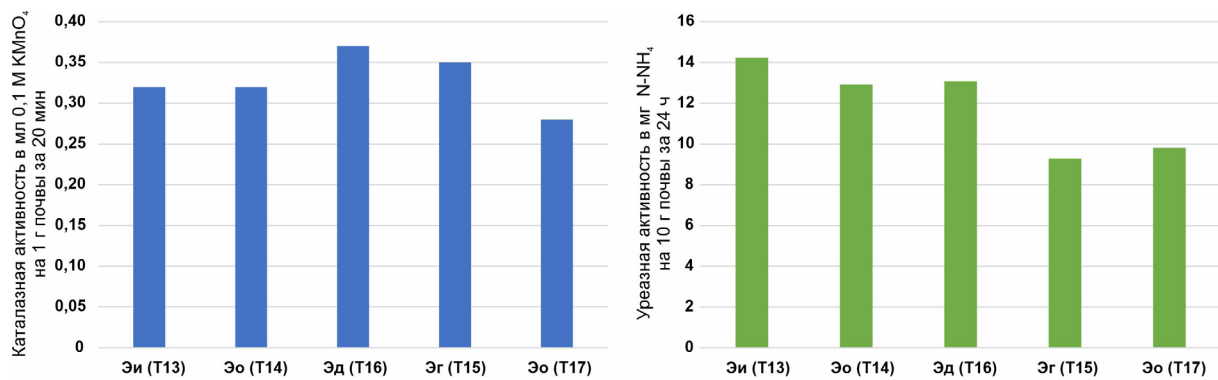


Рис. 5. Средние значения активности каталазы (А) и уреазы (В) в верхних слоях (0–5 см) эмбриоземов.

личением доступности органического вещества, что подтверждено исследованиями техногенных почв в различных регионах (Евдокимова и Калмыкова, 2008; Li et al., 2015; Pulikova et al., 2024).

Активность уреазы (АУ) максимальна в эмбриоземе инициальном и минимальна в гумусово-аккумулятивном (Рис. 5). Наиболее вероятно, что в данном случае активность фермента обусловлена общим содержанием органического вещества как педогенной, так и литогенной природы. Согласно шкале оценки обеспеченности почв ферментами по Д.Г. Звягинцеву (Вальков и др., 2004), в эмбриоземе инициальном (Т13), эмбриоземе органо-аккумулятивном (Т14) и эмбриоземе дерновом (Т16) обогатенность уреазой средняя; эмбриозем гумусово-аккумулятивный (Т15) и эмбриозем органо-аккумулятивный (Т17) характеризуются как бедные ферментом. Обнаружена связь между содержанием органического вещества и активностью уреазы ($R^2 = 0.72$). В работе D.-s. Bai et al. (2022) показано, что активность уреазы в ризосферной области повышена по сравнению с нижележащими горизонтами почвы. Рост активности уреазы при развитии эмбриоземов может быть связан с повышением биоразнообразия растений и увеличения проективного покрытия в ряду Эи → Эг, что, в свою очередь, приводит к формированию мелкозема, накоплению органического вещества и питательных элементов в почвах (Kumar et al, 2015).

Эколого-геохимическая оценка исследуемых почв

В качестве фона для содержания микроэлементов рассмотрен чернозем (Богуславский и др., 2021). В ряду развития эмбриоземов не наблюдается четкой тенденции к изменению количества микроэлементов, однако при снижении щелочности увеличивается количество Cu, Zn и Ni (Табл. 1). В эмбриоземах отмечается превышение Zn, Pb, Cu, Ni, As относительно фона. Превышение данных элементов связано с их содержанием в минералах вскрышных пород (Biswas et al, 2022; Islam et al, 2021). Содержание Cd, Pb, Hg, As и Mo в исследованных почвах превышает кларк по Виноградову (Касимов и Власов, 2015).

Расчет суммарного показателя загрязнения для поверхностного слоя (0–10 см) эмбриоземов лесостепи Кузбасса позволил отнести их к почвам с допустимым уровнем загрязнения ($Z_c < 16$) (Табл. 1). Следует отметить, что почвы и техногенные грунты Талдинского каменноугольного месторождения Кузбасса также характеризуются допустимыми значениями коэффициента (Овсянникова и др., 2020).

Индекс Igeo показал загрязнение As эмбриозема инициального (Т13) и органо-аккумулятивного (Т14) (Рис. 6). В работе Md.A.B. Siddique et al. (2020) Igeo указывают на значительное накопление As и Zn в почвах в районе угольной шахты Барапукурия в Бангладеш. Для эмбриозема дернового (Т16) и гумусово-аккумулятивного (Т15) отмечено загрязнение Pb от слабого до среднего уровня. Загрязнение мышьяком и такими халькофильными элементами, как свинец и кадмий, характерно для ландшафтов угольного профиля (Abliz et al., 2018). Для эмбриозема органо-аккумулятивного (Т17) характерно загрязнение Cu, Ni и As. Индекс Igeo широко применяется для оценки почв, в том числе для территорий с добычей угля. Так, для почв угольного разреза восточного бассейна Ранигандж в Индии отмечается незначительное загрязнение Co, Cu, Ni, Cd и Cr, что, скорее всего, связано с угледобывающей спецификой (Chakraborty et al., 2023; Dutta et al., 2025).

Табл. 1. Валовое содержание микроэлементов в техногенных почвах лесостепной зоны (мг/кг) и индексы их загрязнения тяжелыми металлами. Zc – суммарный показатель загрязнения; * – Zc рассчитан для слоя 0–10 см (как корнеобитаемого) относительно значений фоновых концентраций химических элементов в черноземах лесостепной зоны Кузбасса (Богуславский и др., 2021); ** – ПДК/ОДК по СанПин 1.2.3685-21 (рН КСl >5.5); курсивом выделены значения, превышающие фоновые; серым цветом выделены значения, превышающие ПДК/ОДК по СанПин 1.2.3685-21; полужирным начертанием текста выделены значения, превышающие кларк по Виноградову. Прочерки обозначают отсутствие данных.

Место отбора	Почва (точка отбора пробы)	глубина, см	pH _{KCl}	Элемент											
				Zn	Cd	Pb	Hg	Cu	Co	Ni	As	Mo	Ba	Be	Li
Отвалы угледобывающей лесостепной зоны Кузбасса	Эмбриозем инициальный (Т13)	7.4	2.00	15.38	0.11	25.77	14.54	34.06	62.35	1.31	494.63	2.84	47.47	7.11	
	Эмбриозем органо-аккумулятивный (Т14)	6.7	57.18	1.43	10.73	0.16	22.72	9.81	22.86	0.92	318.37	1.95	43.49	5.79	
	Эмбриозем дерновый (Т16)	6.2	22.76	2.52	22.56	0.17	20.81	14.33	35.91	2.45	1.19	329.5	2.56	45.52	1.74
	Эмбриозем гумусово-аккумулятивный (Т15)	6.0	23.31	2.48	23.69	0.30	33.24	13.83	36.92	2.52	1.15	377.59	2.64	48.67	1.83
	Эмбриозем органо-аккумулятивный (Т17)	5.6	142.17	1.89	18.69	0.12	60.75	26.81	73.28	71.61	1.96	464.38	2.88	48.4	10.98
	Фон – чернозем*	–	95	–	13	–	33	–	37	9	1.55	–	–	–	–
	ПДК/ОДК** по СанПин 1.2.3685-21 ⁷	–	/220.0	/2.0	/130.0	2.1/	/132.0	–	/80.0	/10.0	–	–	–	–	–
Кларк по А.П. Виноградову (Касимов и Власов, 2015)	–	83	0.13	16.00	0.0043	47.00	18.00	58.00	1.70	1.1	650	3.8	–	–	

⁷ СанПин 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

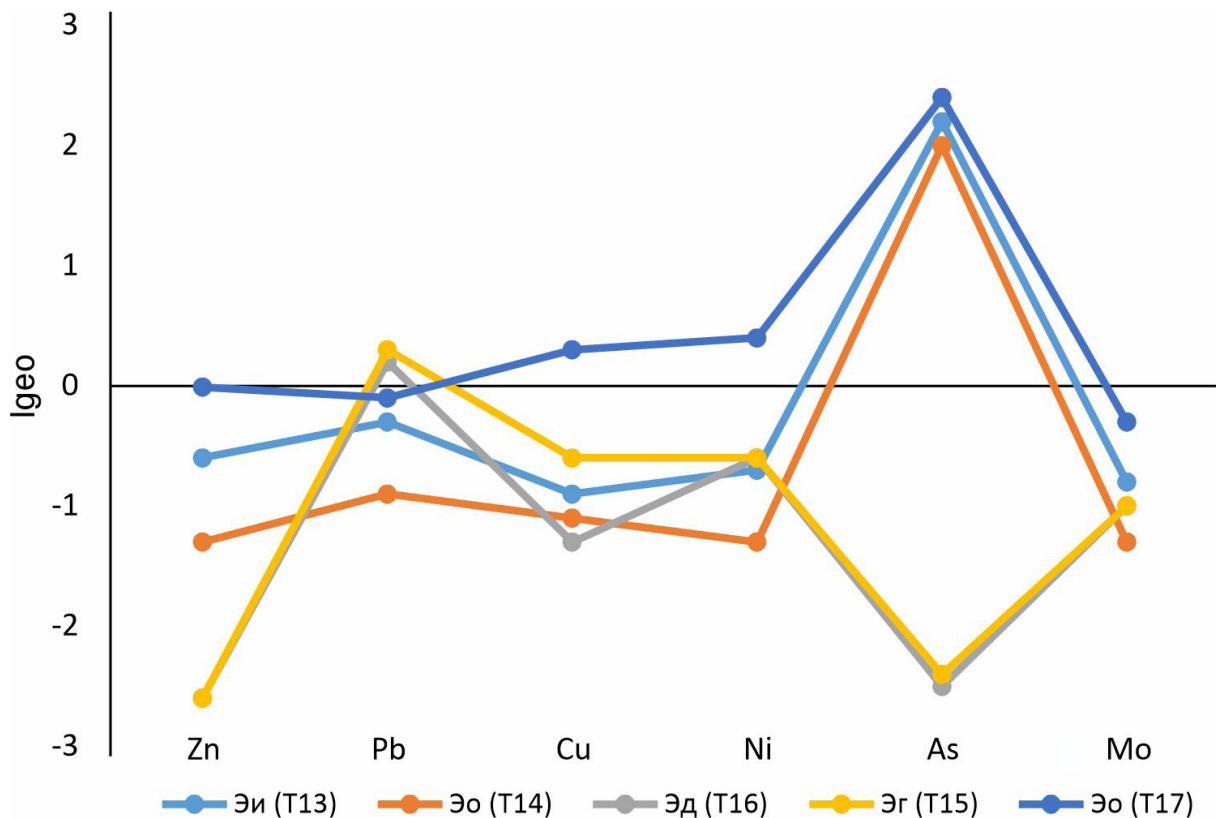


Рис. 6. Индекс геоаккумуляции (I_{geo}) микроэлементов.

Заключение

На исследуемых угольных отвалах лесостепной зоны Кузбасса диагностированы эмбриоземы инициальные, органо-аккумулятивные, дерновые и гумусово-аккумулятивные. В эмбриоземах количество мелкозема увеличивается в процессе почвообразования. За счет увеличения доли фракции мелкозема и развития растительных группировок плотность техногенных почв уменьшается.

Реакция среды водного раствора эмбриоземов колеблется от сильнощелочной до нейтральной в ряду Эи → Эо → Эд → Эг. Содержание органического вещества в исследуемых почвах неоднородное из-за включения углистых частиц и разной степени развития почв в том числе растительности. Наибольшее содержание органического вещества выявлено в эмбриоземе органо-аккумулятивном. Для эмбриозема инициального отмечена средняя степень активности уреазы, для остальных почв – слабая. Активность каталазы в техногенных почвах увеличивается с развитием органогенного слоя и накоплением гумуса.

Эколого-геохимическая оценка поверхностного слоя (0–10 см) эмбриоземов согласно суммарному показателю загрязнения позволила отнести их к почвам с допустимым уровнем загрязнения. Анализ индекса I_{geo} показал, что содержание Pb, Cu и Ni находится на уровне загрязнения от слабого до среднего, в то время как почвы средне-сильно загрязнены As, а загрязнение Zn и Mo отсутствует.

Список литературы

- Акулов, А.О., 2014. Влияние угольной промышленности на окружающую среду и перспективы развития по модели декарпинга. *Регион: экономика и социология* 1 (81), 272–288.
- Андроханов, В.А., 2005. Почвенно-экологическое состояние техногенных ландшафтов: динамика и оценка. *Диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук*. Новосибирск, Россия, 379 с.

- Андроханов, В.А., Куляпина, Е.Д., Курачев, В.М. Почвы техногенных ландшафтов: генезис и эволюция, 2004. Издательство Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия, 151 с.
- Беланов, И.П., Семина, И.С., Шипилова, А.М., 2013. Почвенно-экологическое состояние естественных ландшафтов в районе интенсивной добычи каменного угля. *Горный информационно-аналитический бюллетень* 10, 308–313.
- Богуславский, А.Е., Андроханов, В.А., Колмагорова, Ю.О., Ужогова, А.А., Госсен, И.Н., Исаева, О.П., 2021. Геохимический фон тяжелых металлов в почвах и растениях на участках отвалов угольных месторождений. *Известия Алтайского отделения Русского географического общества* 2, 40–50. <https://doi.org/10.24412/2410-1192-2021-16104>
- Брагина, П.С., 2016. Почвообразование на отходах горнодобывающих предприятий Кемеровской области. *Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук*. Москва, Россия, 156 с.
- Брагина, П.С., Цибарт, А.С., Завадская, М.П., Шарапова, А.В., 2014. Почвы на отвалах вскрышных пород в лесостепной и горно-таежной зонах Кузбасса. *Евразийское почвоведение* 7 (47), 878–889.
- Вальков, В.Ф., Елисеева, Н.В., Имгрунт, И.И., Казеев, К.Ш., Колесников, С.И., 2004. Справочник по оценке почв. ГУРИПП “Адыгея”, Майкоп, Россия, 236 с.
- Воробьева, Е.Е., Фотина, Н.В., Асякина, Л.К., Осинцева, М.А., Просеко, А.Ю., 2023. Оценка химических и санитарных показателей грунтов угольных отвалов юга Кузнецкой котловины. *Трансформация экосистем* 5 (4), 83–97. <https://doi.org/10.23859/estr-220603>
- Гиззатова, Г.Л., Шипаева, Т.А., 2016. Уреаза – ключевой фермент биодegradации мочевины. *Международный научно-исследовательский журнал* 45 (3), 88–90.
- Госсен, И.Н., Беланов, И.П., 2011. Гранулометрический состав эмбриоземов в техногенных ландшафтах лесостепной зоны Кузбасса. *Сибирский экологический журнал* 18 (5), 713–718.
- Евдокимова, Г.Л., Калмыкова, В.В., 2008. Биологическая активность рекультивированных промышленных отвалов в условиях северной тайги. *Агрохимия* 1, 63–67.
- Зиновьева, О.М., Колесникова, Л.А., Меркулова, А.М., 2020. Анализ экологических проблем в угледобывающих регионах. *Уголь* 10, 62–67. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-10-62-67>
- Зинченко, М.К., Зинченко, СИ., 2020. Мониторинг ферментативной активности уреазы в серых лесных почвах Верхневолжья. *Земледелие* 6, 21–24.
- Зинченко, М.К., 2021. Мониторинг активности каталазы в серой лесной почве Верхневолжья. *Владимирский земледелец* 1 (95), 7–11.
- Исмаилов, Г.М., Логвиненко, Е.Е., Слободенюк, А.И., Дроздова, Е.А., Корехова, А.Р., 2023. Влияние угольной промышленности на экологическую безопасность Кузбасса. *Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции «Вызовы глобализации и развитие цифрового общества в условиях новой реальности»*. Москва, Россия, 136–141.
- Калинина, А.В., Гермонова, Е.А., 2018. Геостратегическая визуализация фитоценозов породных отвалов угольных шахт г. Макеевки в условиях самозарастания и рекультивации. *Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона* 3, 28–34.
- Касимов, Н.С., Власов, Д.В., 2015. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии. *Вестник Московского университета. Серия 5. География* 2, 7–17.

- Колпакова, Д.Е., Милентьева, И.С., Асякина, Л.К., Фотина, Н.В., Просеков, А.Ю., 2024. Особенности минералогического состава техногенных почв угольных отвалов Кузбасса. *Юг России: экология, развитие* 19 (2), 92–103. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2024-2-9>
- Копытов, А.И., Куприянов, А.Н., 2019. Новая стратегия развития угольной отрасли Кузбасса и решение экологических проблем. *Уголь* 11, 89–93. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-11-89-93>
- Курачев, В.М., Андроханов, В.А., 2002. Классификация почв техногенных ландшафтов. *Сибирский экологический журнал* 9 (3), 255–261.
- Кутепов, Ю.И., Кутепова, Н. А., Васильева, А. Д., Мухина, А. С., 2021. Инженерно-геологические и экологические проблемы при эксплуатации и рекультивации высоких отвалов на разрезах Кузбасса. *Горный информационно-аналитический бюллетень* 8, 164–178. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_8_0_164
- Меркурьев, В.В., Косинский, П.Д., Томилин, К.В., 2021. Экономические последствия развития угледобывающей отрасли региона: оценка эколого-экономических потерь. *Уголь* 11, 19–24. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-11-19-24>
- Новоселова, Е.И., Волкова, О.О., 2017. Влияние тяжелых металлов на активность каталазы разных типов почв. *Известия ОГАУ* 2 (64), 190–193.
- Новоселова, Е.И., Тухватуллина, А.Ф., 2009. Роль ферментативной активности в осуществлении почвой трофической функции в условиях нефтяного загрязнения. *Вестник ОГУ* 6, 592–593.
- Овсянникова, С.В., Середина, В.П., Беннер, М.В., 2020. Эколого-геохимическое состояние территории Талдинского каменноугольного месторождения. *Сборник материалов VII Международной научной конференции «Отражение био-, гео-, антропогенных взаимодействий в почвах и почвенном покрове»*. Томск, Россия, 280–283.
- Перевощикова, А.А., Малышкина, Е.Е., Митракова, Н.В., 2023. Анализ микроэлементного состава почв рекультивированных отвалов Кизеловского угольного бассейна. *Уголь* 12, 85–91. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-12-85-91>
- Середина, В.П., Алексеева, Т.П., Сыроева, Л.Н., Трунова, Н.М., Бурмистрова, Т.И., 2012. Исследование процессов формирования органического вещества в нарушенных при угледобыче почвах. *Вестник Томского государственного университета* 1 (17), 18–31.
- Терехова, В.А., 2007. Микробиоты в экологической оценке водных и наземных экосистем. Наука, Москва, Россия, 215 с.
- Трофимов, С.С., 1975. Экология почв и почвенные ресурсы Кемеровской области. Наука, Сибирское отделение, Новосибирск, СССР, 300 с.
- Удодов, Ю.В., 2017. Геолого-геоморфологическая характеристика и полезные ископаемые Кемеровской области. *Вестник Кемеровского государственного университета* 2 (1), 53–59.
- Хазиев, Ф.Х., 1982. Системно-экологический анализ ферментативной активности почв. Наука, Москва, СССР, 202 с.
- Хазиев, Ф.Х., 1990. Методы почвенной энзимологии. Наука, Москва, СССР, 192 с.
- Хлонов, Ю.П., 1979. Деревья и кустарники юго-восточной части Западной Сибири. Наука, Сибирское отделение, Новосибирск, СССР, 127 с.

- Abliz, A., Shi, Q., Keyimu, M. Sawut R., 2018. Spatial distribution, source, and risk assessment of soil toxic metals in the coal-mining region of northwestern China. *Arabian Journal of Geosciences* **11**, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4152-8>
- Bai, D.-s., Wang, Yi-w., Yang, X., Lai, J.-l., Luo, X.-g., 2022. Effects of long-term (10 years) remediation of Caragana on soil enzyme activities, heavy metals, microbial diversity and metabolic spectrum of coal gangue. *Ecological Engineering* **181**, 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106679>
- Biswas, A., Hendry, M.J., Essilfie-Dughan, J., Day, S., Villeneuve, S.A., Barbour, S.L., 2022. Geochemistry of zinc and cadmium in coal waste rock, Elk Valley, British Columbia, Canada. *Applied Geochemistry* **136**, 105148. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.105148>
- Chakraborty, P., Wood, D.A., Singh, S., Hazra, B., 2023. Trace element contamination in soils surrounding the open-cast coal mines of eastern Raniganj basin, India. *Environmental Geochemistry and Health* **45**, 7275–7302. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01556-1>
- Dutta, S., Jain, M. K., Kumar, D., 2025. Evaluation of soil heavy metals in Raniganj open-cast coal mines in India: Spatial distribution, Positive Matrix Factorization and Monte Carlo Simulation. *Process Safety and Environmental Protection* **194**, 1038–1055. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.12.039>
- Islam, N., Rabha, S., Subramanyam, K.S.V., Saikia B.K., 2021. Geochemistry and mineralogy of coal mine overburden (waste): A study towards their environmental implications. *Chemosphere* **274**, 129736. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129736>
- Ghrefat, H.A., Abu-Rukah, Y., Rosen, M.A., 2011. Application of geoaccumulation index and enrichment factor for assessing metal contamination in the sediments of Kafra dam, Jordan. *Environmental Monitoring and Assessment* **178** (1–4), 95–109. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1675-1>
- Kumar, S., Maiti, S.K., Chaudhuri, S., 2015. Soil development in 2–21 years old coalmine reclaimed spoil with trees: A case study from Sonapur-Bazari opencast project, Raniganj Coalfield, India. *Ecological Engineering* **84**, 311–324. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.043>
- Li, J., Zhou, X., Yan, J., Li, H., He, J., 2015. Effects of regenerating vegetation on soil enzyme activity and microbial structure in reclaimed soils on a surface coal mine site. *Applied Soil Ecology* **87**, 56–62. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.11.010>
- Liu, C., Song, Y., Dong, X., Wang, X., Ma, X., Zhao, G., Zang, S., 2021. Soil enzyme activities and their relationships with soil C, N, and P in peatlands from different types of permafrost regions, Northeast China. *Frontiers in Environmental Science* **9**, 456–468. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.670769>
- Martinez, L.L.G., Poleto, C., 2014. Assessment of diffuse pollution associated with metals in urban sediments using the geoaccumulation index (I-geo). *Journal of Soils and Sediments* **14** (7), 1251–1257. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0871-y>
- Nadudvari, A., Kozielska, B., Abramowicz, A., Fabianska, M., Ciesielczuk, J., Cabala, J., Krzykowski, T., 2021. Heavy metal-and organic-matter pollution due to self-heating coal-waste dumps in the Upper Silesian Coal Basin (Poland). *Journal of Hazardous Materials* **412**, 125–244. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125244>
- Pulikova, E.P., Demin, K.A., Ivanov, F.D., Gorovtsov, A.V., Rajput, V.D. et al., 2024. Soil physicochemical and microbial properties affect nitrogen cycling in technogenically transformed coal dump soils. *Applied Soil Ecology* **202**, 25–37. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105562>
- Siddique, Md.A.B, Alam, Md.K., Islam, S., Diganta, M.T.M., Akbor, Md.A. et al., 2020. Apportionment of some chemical elements in soils around the coal mining area in northern Bangladesh and associated

health risk assessment. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management* **14**, 100366. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100366>

Singh, K.N., Narzary, D., 2021. Geochemical characterization of mine overburden strata for strategic overburden-spoil management in an opencast coal mine. *Environmental Challenges* **3**, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100060>

Wander, M., 2009. Measures of soil biology and biological activity. *Agriculture* **10**, 15–21.

Yuan, Y., Zhao, Z., Niu, S., Li, X., Wang, Y., Bai, Z., 2018. Reclamation promotes the succession of the soil and vegetation in opencast coal mine: A case study from *Robinia pseudoacacia* reclaimed forests, Pingshuo mine, China. *Catena* **165**, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.01.025>

References

Abliz, A., Shi, Q., Keyimu, M. Sawut R., 2018. Spatial distribution, source, and risk assessment of soil toxic metals in the coal-mining region of northwestern China. *Arabian Journal of Geosciences* **11**, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4152-8>

Akulov, A.O., 2014. Vliyaniye ugolnoy promyshlennosti na okruzhayushchuyu sredu i perspektivy razvitiya po modeli dekaplinga [The impact of the coal industry on the environment and development prospects based on the decoupling model]. *Region: ekonomika i sotsiologiya [Region: Economics and Sociology]* **1** (81), 272–288. (In Russian).

Androkhanov, V.A., 2005. Pochvenno-ekologicheskoe sostoyanie tekhnogennykh landshaftov: dinamika i otsenka [Soil and ecological state of technogenic landscapes: dynamics and assessment]. *Doctor of Sciences in Biology thesis*. Novosibirsk, Russia, 379 p. (In Russian).

Androkhanov, V.A., Kulyapina, E.D., Kurachev, V.M., 2004. Pochvi tehno-genennykh landshaftov: genesis i evolutsiya [Soils of technogenic landscapes: genesis and evolution]. Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia, 151 p. (In Russian).

Bai, D.-s., Wang, Yi-w., Yang, X., Lai, J.-l., Luo, X.-g., 2022. Effects of long-term (10 years) remediation of Caragana on soil enzyme activities, heavy metals, microbial diversity and metabolic spectrum of coal gangue. *Ecological Engineering* **181**, 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106679>

Belanov, I.P., Semina, I.S., Shipilova, A.M., 2013. Pochvenno-ekologicheskoe sostoyanie estestvennykh landshaftov v rayone intensivnoy dobychi kamennogo uglya [The soil and ecological state of natural landscapes in the area of intensive coal mining]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten [Mining Information and Analytical Bulletin]* **10**, 308–313. (In Russian).

Biswas, A., Hendry, M.J., Essilfie-Dughan, J., Day, S., Villeneuve, S.A., Barbour, S.L., 2022. Geochemistry of zinc and cadmium in coal waste rock, Elk Valley, British Columbia, Canada. *Applied Geochemistry* **136**, 105148. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.105148>

Boguslavskiy, A.E., Androkhanov, V.A., Kolmagorova, Yu.O., Uzhogova, A.A., Gossen, I.N., Isaeva, O.P., 2021. Geokhimicheskiy fon tyazhelykh metallov v pochvakh i rasteniyakh na uchastkakh otvalov ugolnykh mestorozhdeniy [Geochemical background of heavy metals in soils and plants in coal deposit landfills]. *Izvestiya Altayskogo otdeleniya Russkogo geograficheskogo obshchestva [Proceedings of the Altai Branch of the Russian Geographical Society]* **2**, 40–50. (In Russian). <https://doi.org/10.24412/2410-1192-2021-16104>

Bragina, P.S., 2016. Pochvoobrazovanie na otkhodakh gornodobyvayushchikh predpriyatiy Kemerovskoy oblasti [Soil formation on waste from mining enterprises of the Kemerovo region]. *PhD of Sciences in Geography thesis*. Moscow, Russia, 156 p. (In Russian).

- Chakraborty, P., Wood, D.A., Singh, S., Hazra, B., 2023. Trace element contamination in soils surrounding the open-cast coal mines of eastern Raniganj basin, India. *Environmental Geochemistry and Health* **45**, 7275–7302. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01556-1>
- Dutta, S., Jain, M. K., Kumar, D., 2025. Evaluation of soil heavy metals in Raniganj open-cast coal mines in India: Spatial distribution, Positive Matrix Factorization and Monte Carlo Simulation. *Process Safety and Environmental Protection* **194**, 1038–1055. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.12.039>
- Evdokimova, G.L., Kalmykova, V.V., 2008. Biologicheskaya aktivnost rekultivirovannykh promyshlennykh otvalov v usloviyakh severnoy taygi [Biological activity of reclaimed industrial dumps in the conditions of the northern taiga]. *Agrokimiya [Agrochemistry]* **1**, 63–67. (In Russian).
- Ghrefat, H.A., Abu-Rukah, Y., Rosen, M.A., 2011. Application of geoaccumulation index and enrichment factor for assessing metal contamination in the sediments of Kafra dam, Jordan. *Environmental Monitoring and Assessment* **178** (1–4), 95–109. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1675-1>
- Gizatova, G.L., Shipaeva, T.A., 2016. Ureaza – klyuchevoy ferment biodegradatsii mocheviny [Urease is a key enzyme of urea biodegradation]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal [International Scientific Research Journal]* **45** (3), 88–90. (In Russian).
- Gossen, I.N., Belanov, I.P., 2011. Granulometricheskoy sostav embriozemov v tekhnogennykh landshaftakh lesostepnoy zony Kuzbassa [Granulometric composition of embryozems in technogenic landscapes of the forest-steppe zone of Kuzbass]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal [Siberian Ecological Journal]* **18** (5), 713–718. (In Russian).
- Islam, N., Rabha, S., Subramanyam, K.S.V., Saikia B.K., 2021. Geochemistry and mineralogy of coal mine overburden (waste): A study towards their environmental implications. *Chemosphere* **274**, 129736. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129736>
- Ismailov, G.M., Logvinenko, E.E., Slobodenyuk, A.I., Drozdova, E.A., Korekhova, A.R., 2023. Vliyanie ugolnoy promyshlennosti na ekologicheskuyu bezopasnost Kuzbassa [The impact of the coal industry on the environmental safety of Kuzbass]. *Sbornik materialov VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Vyzovy globalizatsii i razvitie tsifrovogo obshchestva v usloviyakh novoy realnosti» [Collection of materials of the VI International Scientific and Practical Conference «Challenges of globalization, and the development of a digital society in the context of a new reality»]*. Moscow, Russia, 136–141. (In Russian).
- Kalinina, A.V., Germonova, E.A., 2018. Geostrategicheskaya vizualizatsiya fitotsenozov porodnykh otvalov ugolnykh shakht g. Makeevki v usloviyakh samozarastaniya i rekultivatsii [Geostrategic visualization of phytocenoses of rock dumps of coal mines in Makeyevka in conditions of self-flooding and reclamation]. *Problemy ekologii i okhrany prirody tekhnogenogo regiona [Problems of Ecology and Nature Protection of a Man-made Region]* **3**, 28–34. (In Russian).
- Kasimov, N.S., Vlasov, D.V., 2015. Clarkes of chemical elements as comparison standards in ecogeochemistry. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya [Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography]* **2**, 7–17. (In Russian).
- Khaziev, F.H., 1982. Sistemno-ekologicheskiy analiz fermentativnoy aktivnosti pochv [System-ecological analysis of soil enzymatic activity]. Nauka, Moscow, USSR, 202 p. (In Russian).
- Khaziev, F.H., 1990. Metody pochvennoy enzimologii [Methods of soil enzymology]. Nauka, Moscow, USSR, 192 p. (In Russian).
- Khlonov, Yu.P., 1979. Derev'ia i kustarniki iugo-vostochnoi chasti Zapadnoi Sibiri [Trees and shrubs of the southeastern part of Western Siberia]. Nauka Siberian Branch, Novosibirsk, USSR, 127 p. (In Russian).

- Kolpakova, D.E., Milentyeva, I.S., Asiakina, L.K., Fotina, N.V., Prosekov, A.Yu., 2024. Osobennosti mineralogicheskogo sostava tekhnogennykh pochv ugolnykh otvalov Kuzbassa [Features of the mineralogical composition of technogenic soils of coal dumps in Kuzbass]. *Yug Rossii: ekologiya, razvitie [The South of Russia: Ecology, Development]* **19** (2), 92–103. (In Russian). <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2024-2-9>
- Kopytov, A.I., Kupriyanov, A.N., 2019. Novaya strategiya razvitiya ugolnoy otrasli Kuzbassa i reshenie ekologicheskikh problem [A new strategy for the development of the Kuzbass coal industry and the solution of environmental problems]. *Ugol [Coal]* **11**, 89–93. (In Russian). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-11-89-93>
- Kumar, S., Maiti, S.K., Chaudhuri, S., 2015. Soil development in 2–21 years old coalmine reclaimed spoil with trees: A case study from Sonapur-Bazari opencast project, Raniganj Coalfield, India. *Ecological Engineering* **84**, 311–324. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.043>
- Kurachev, V.M., Androkhonov, V.A., 2002. Klassifikatsiya pochv tekhnogennykh landshaftov [Classification of soils of man-made landscapes]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal [Siberian Ecological Journal]* **9** (3), 255–261. (In Russian).
- Kutepov, Yu.I., Kutepova, N.A., Vasilyeva, A.D., Mukhina, A.S., 2021. Inzhenerno-geologicheskie i ekologicheskie problemy pri ekspluatatsii i rekultivatsii vysokikh otvalov na razrezakh Kuzbassa [Engineering, geological and environmental problems during the operation and reclamation of high dumps in the Kuzbass mines]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten [Mining Information and Analytical Bulletin]* **8**, 164–178. (In Russian). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_8_0_164
- Li, J., Zhou, X., Yan, J., Li, H., He, J., 2015. Effects of regenerating vegetation on soil enzyme activity and microbial structure in reclaimed soils on a surface coal mine site. *Applied Soil Ecology* **87**, 56–62. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.11.010>
- Liu, C., Song, Y., Dong, X., Wang, X., Ma, X., Zhao, G., Zang, S., 2021. Soil enzyme activities and their relationships with soil C, N, and P in peatlands from different types of permafrost regions, Northeast China. *Frontiers in Environmental Science* **9**, 456–468. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.670769>
- Martinez, L.L.G., Poletto, C., 2014. Assessment of diffuse pollution associated with metals in urban sediments using the geoaccumulation index (I-geo). *Journal of Soils and Sediments* **14** (7), 1251–1257. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0871-y>
- Merkuryev, V.V., Kosinsky, P.D., Tomilin, K.V., 2021. Ekonomicheskie posledstviya razvitiya ugledobyvayushchey otrasli regiona: otsenka ekologo-ekonomicheskikh poter [Economic consequences of the development of the coal mining industry in the region: assessment of ecological and economic losses]. *Ugol [Coal]* **11**, 19–24. (In Russian). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-11-19-24>
- Nadudvari, A., Kozielska, B., Abramowicz, A., Fabianska, M., Ciesielczuk, J., Cabala, J., Krzykowski, T., 2021. Heavy metal-and organic-matter pollution due to self-heating coal-waste dumps in the Upper Silesian Coal Basin (Poland). *Journal of Hazardous Materials* **412**, 125–244. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125244>
- Novoselova, E.I., Tukhvatullina, A.F., 2009. Rol' fermentativnoy aktivnosti v osushchestvlenii pochvoy troficheskoy funktsii v usloviyakh neftyanogo zagryazneniya [The role of enzymatic activity in the implementation of trophic function by the soil in conditions of oil pollution]. *Vestnik OGU [Bulletin of Orenburg State University]* **6**, 592–593. (In Russian).
- Novoselova, E.I., Volkova, O.O., 2017. Vliyaniye tyazhelykh metallov na aktivnost katalazy raznykh tipov pochv [The influence of heavy metals on catalase activity in different soil types]. *Izvestiya OGAU [News of Orenburg State Agrarian University]* **2** (64), 190–193. (In Russian).

- Ovsyannikova, S.V., Seredina, V.P., Benner, M.V., 2020. Ekologo-geokhimicheskoe sostoyanie territorii Taldinskogo kamennougolnogo mestorozhdeniya [Ecological and geochemical condition of the territory of the Taldinsky coal deposit]. *Sbornik materialov VII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Otrazhenie bio-, geo-, antroposfernykh vzaimodeystviy v pochvakh i pochvennom pokrove» [Collection of materials of the VII International Scientific Conference "Reflection of bio-, geo-, and anthropospheric interactions in soils and soil cover"]*. Tomsk, Russia, 280–283. (In Russian).
- Perevoshchikova, A.A., Malyshkina, E.E., Mitrakova, N.V., 2023. Analiz mikroelementnogo sostava pochv rekultivirovannykh otvalov Kizelovskogo ugolnogo basseyna [Analysis of the microelement composition of soils of reclaimed landfills of the Kizelovsky coal basin]. *Ugol [Coal]* **12**, 85–91. (In Russian). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-12-85-91>
- Pulikova, E.P., Demin, K.A., Ivanov, F.D., Gorovtsov, A.V., Rajput, V.D. et al., 2024. Soil physicochemical and microbial properties affect nitrogen cycling in technogenically transformed coal dump soils. *Applied Soil Ecology* **202**, 25–37. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105562>
- Seredina, V.P., Alekseeva, T.P., Sysoeva, L.N., Trunova, N.M., Burmistrova, T.I., 2012. Issledovanie protsessov formirovaniya organicheskogo veshchestva v narushennykh pri ugledobyche pochvakh [Investigation of the processes of organic matter formation in soils disturbed by coal mining]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Tomsk State University]* **1** (17), 18–31. (In Russian).
- Siddique, Md.A.B, Alam, Md.K., Islam, S., Diganta, M.T.M., Akbor, Md.A. et al., 2020. Apportionment of some chemical elements in soils around the coal mining area in northern Bangladesh and associated health risk assessment. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management* **14**, 100366. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100366>
- Singh, K.N., Narzary, D., 2021. Geochemical characterization of mine overburden strata for strategic overburden-spoil management in an opencast coal mine. *Environmental Challenges* **3**, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100060>
- Terekhova, V.A., 2007. Mikromitsety v ekologicheskoy otsenke vodnykh i nazemnykh ekosistem [Micromycetes in the ecological assessment of aquatic and terrestrial ecosystems]. Nauka, Moscow, Russia, 215 p. (In Russian).
- Trofimov, S.S., 1975. Ekologiya pochv i pochvennye resursy Kemerovskoy oblasti [Soil ecology and soil resources of the Kemerovo region]. Nauka, Siberian Branch, Novosibirsk, USSR, 300 p. (In Russian).
- Udodov, Yu.V., 2017. Geologo-geomorfologicheskaya kharakteristika i poleznye iskopaemye Kemerovskoy oblasti [Geological and geomorphological characteristics and minerals of the Kemerovo region]. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Kemerovo State University]* **2** (1), 53–59. (In Russian).
- Valkov, V.F., Eliseeva, N.V., Imgrunt, I.I., Kazeev, K.S., Kolesnikov, S.I. 2004. Spravochnik po otsenke pochv [Soil assessment handbook]. Publishing and printing enterprise “Adigeya”, Maicop, Russia, 236 p. (In Russian).
- Vorobyeva, E.E., Fotina, N.V., Asyakina, L.K., Osintseva, M.A., Proseko, A.Yu., 2023. Assessment of chemical and sanitary parameters of the soils of coal dumps in the south of the Kuznetsk basin. *Ecosystem transformation* **5** (4), 83–97 <https://doi.org/10.23859/estr-220603>.
- Wander, M., 2009. Measures of soil biology and biological activity. *Agriculture* **10**, 15–21.
- Yuan, Y., Zhao, Z., Niu, S., Li, X., Wang, Y., Bai, Z., 2018. Reclamation promotes the succession of the soil and vegetation in opencast coal mine: A case study from *Robinia pseudoacacia* reclaimed forests, Pingshuo mine, China. *Catena* **165**, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.01.025>

Zinchenko, M.K., 2021. Monitoring aktivnosti katalazy v seroy lesnoy pochve Verkhnevolzhya [Monitoring of catalase activity in gray forest soil of the Upper Volga region]. *Vladimirskiy zemledelets [Vladimir Farmer]* 1 (95), 7–11. (In Russian).

Zinchenko, M.K., Zinchenko, S.I., 2020. Monitoring fermentativnoy aktivnosti ureazy v serykh lesnykh pochvakh Verkhnevolzhya [Monitoring the enzymatic activity of urease in gray forest soils of the Upper Volga region]. *Zemledelie [Agriculture]* 6, 21–24. (In Russian).

Zinovieva, O.M., Kolesnikova, L.A., Merkulova, A.M., 2020. Analiz ekologicheskikh problem v ugledobyvayushchikh regionakh [Analysis of environmental problems in coal-mining regions]. *Ugol [Coal]* 10, 62–67. (In Russian). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-10-62-67>