



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-04-206>

УДК 631.453:631.618:504.53:622



Химико-экологические свойства почв и индекс NDVI на рекультивированных сернистоугольных отвалах бореальной зоны

Н. В. Митракова  , Е. А. Хайрулина  , А. А. Перевощикова  , Н. В. Порошина  ,
Е. Е. Мальшкіна  , Е. С. Яковлева  , Н. А. Кобелев  

Пермский государственный национальный исследовательский университет,

г. Пермь, Российская Федерация

✉ mitrakovanatalya@mail.ru

Аннотация

Рекультивация угольных отвалов путем создания устойчивого почвенного и растительного покрова на их поверхности способствует восстановлению экологических систем. В связи с этим актуальным является изучение свойств почв техногенных ландшафтов. Проблема биологической рекультивации изучалась на территории Кизеловского угольного бассейна. Оценена эффективность рекультивации на нескольких сернистоугольных отвалах. Методы рекультивации, как и период формирования почвенно-растительного покрова, различались. Агрохимические свойства почв отвалов изучали стандартными методами. Индекс NDVI (нормализованный относительный индекс растительности) рассчитан по снимкам Sentinel-2 и Landsat 7,8. Для оценки биологической активности использовали фитотестирование. Литостраты варьировались от слабокислых до нейтральных ($\text{pH-H}_2\text{O} = 6,1-6,8$); эмбриозем имел слабощелочную реакцию (7,9). Эмбриозем благодаря наличию частиц угля имел наибольшее содержание органического вещества (12–7,7%). В зависимости от «возраста» почвы количество органического вещества в литостратах варьировало: для 7-летнего литострата оно колебалось от 2,4 до 8,9%, а для 4-летнего было меньше 1%. Поглощательная способность литостратов была аналогична с фоновой почвой. Почвы отвалов характеризовались низким уровнем питательных элементов (NPK), а 4-летний литострат имел самое низкое содержание N. Почвы отвалов показали благоприятные условия для роста растений, о чем свидетельствуют высота и масса кресс-салата и овса. Рассчитанный индекс NDVI для всех отвалов имел значения от 0,4 до 0,6, что свидетельствует о наличии устойчивого растительного покрова. Реализованные рекультивационные мероприятия доказали свою эффективность.

Ключевые слова

уголь, отвалы, отходы, рекультивация, почвообразование, литострат, почва, индекс NDVI, эмбриозем, Fe^{2+} , SO_4^{2-} , H^+ , pH

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00324, <https://rscf.ru/project/24-27-00324/>.

Для цитирования

Mitrakova N. V., Khayrulina E. A., Perevoshchikova A. A., Poroshina N. V., Malyshkina E. E., Yakovleva E. S., Kobelev N. A. Chemical and ecological properties of soils and the NDVI analysis on reclaimed sulfide coal waste dumps in the boreal zone. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(4):406–419. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-04-206>

SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research paper

Chemical and ecological properties of soils and the NDVI analysis on reclaimed sulfide coal waste dumps in the boreal zone

N. V. Mitrakova  , E. A. Khayrulina  , A. A. Perevoshchikova  , N. V. Poroshina  ,
E. E. Malyshkina  , E. S. Yakovleva  , N. A. Kobelev  

Perm State National Research University, Perm, Russian Federation

✉ mitrakovanatalya@mail.ru

Abstract

Reclamation of coal waste dumps through the establishment of a stable soil and vegetation cover on their surface contributes to the restoration of ecological systems. Therefore, studying the properties of soils in technogenic landscapes is of current importance. The problem of biological reclamation was studied in the



Kizel Coal Basin area. The effectiveness of reclamation was evaluated on several sulfide coal waste dumps. The reclamation methods, as well as the period of soil-vegetation cover formation, varied. Agrochemical properties of the dump soils were studied using unified methods. The NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) was calculated based on Sentinel-2 and Landsat 7,8 images. To assess biological activity, phytotesting was used. The lithostrats ranged from slightly acidic to neutral ($\text{pH-H}_2\text{O} = 6.1-6.8$); the embryonic soil showed a slightly alkaline reaction (7.9). The embryonic soil, due to the presence of coal particles, had the highest organic matter content (12–7.7%). Depending on the “age” of the soil, the amount of organic matter in the lithostrats varied: for the 7-year-old lithostrat, it ranged from 2.4 to 8.9%, while for the 4-year-old lithostrat, it was less than 1%. The absorption capacity of the lithostrats was similar to that of the background soil. The dump soils were characterized by low levels of nutrients (NPK), with the 4-year-old lithostrat having the lowest N content. The dump soils demonstrated favorable conditions for plant growth, as evidenced by the height and biomass of cress and oats. The calculated NDVI for all dumps ranged from 0.4 to 0.6, indicating the presence of a stable vegetation cover. The implemented reclamation measures proved to be effective.

Keywords

coal, dump, waste, reclamation, soil formation, lithostrat, soil, NDVI index, embryonic soil, Fe^{2+} , SO_4^{2-} , H^+ , pH

Funding

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-27-00324, <https://rscf.ru/project/24-27-00324/>.

For citation

Mitrakova N.V., Khayrulina E.A., Perevoshchikova A.A., Poroshina N.V., Malyshkina E.E., Yakovleva E.S., Kobelev N.A. Chemical and ecological properties of soils and the NDVI analysis on reclaimed sulfide coal waste dumps in the boreal zone. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(4):406–419. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-04-206>

Введение

Горнодобывающая промышленность, в частности угледобыча, во многом способствует преобразованию природных экосистем. Подземные разработки вызывают изменение рельефа и оседание поверхности, так, в исследовании [1] смещение определено по записям годовых колец деревьев лиственницы Европейской *Larix decidua*, при этом авторы подтвердили наибольшую активность оседания в период интенсивной добычи полезных ископаемых. В результате горной добычи происходит изъятие земель под отходы. На территории Кузнецкого угольного бассейна ежегодно образуется около 3,6 млрд т отходов, при этом к настоящему времени площадь нарушенных открытым способом добычи земель увеличена до 16,4 га на 1 млн т добытого угля [2]. В почвах, прилегающих к отвалам, наблюдается высокое содержание полиаренов [3], их источником служат выбросы горящих отвалов, которые в результате атмосферного переноса распространяются на близлежащие территории. В выбросах горящих отвалов обнаружен нафталин, при этом его количество выше в отходах, содержащих пирогенный битум. Также выявлены антрацен, фенантрен, флуорантен и пирен, причем три последних указывают на интенсивное окисление органических веществ [4]. Почвы угледобывающих территорий часто подвержены загрязнению тяжёлыми металлами. В почвах шахтных районов повышена концентрация Cr, Ni и Hg относительно нормативных значений [5]. Причиной загрязнения почв и водных объектов является наличие микроэлементов в угле. Так, авторы [6] обнаружили, что во вмещающих породах угля при выщелачивании высвобождаются Se, Cd, Hg, As, Be и V Cr и Pb. Высокое содержание Fe, Al, Mn, Be и других элементов в реках Кизеловского угольного бассейна описано в работах [7, 8]. Использование коэффициента *Igeo* показало загрязнение Co, V,

Nb, Hg, Sn, Zn, Sm, Ni, Cr, Gd донных отложений реки Косьва на территории КУБа [9]. Добыча угля, помимо загрязнения окружающей природной среды, приводит к изменению гидрологического режима. Результаты исследований [10] показали, что сток, глубина стока и весенний сток вследствие добычи угля уменьшились примерно на 25, 30 и 57% соответственно, рассчитанные модули эрозии почвы и потеря почвы увеличены почти на 200%.

Угли и углесодержащие породы крупнотоннажных отвалов добычи содержат большое количество сульфидов и органической серы в составе полезных ископаемых отвалов, при этом на различных месторождениях содержание серы в углях отличается. В составе углей Кизеловского угольного бассейна содержание серы составляет около 5–8%, при этом сера имеет преимущественно пиритную природу [11]. Исследование Singh и Narzary [12] по изучению вскрышных и угольных пластов на шахте Тикок в Индии показали, что содержание серы в разных пластах колебалось от 0,02 до 2,5%, при этом для угольного пласта максимальное содержание серы составило 1,9%.

Пирит и другие сульфиды в отвалах вскрышной породы в окислительных условиях химически нестабильны. Первоначально при воздействии воды и кислорода с нейтральным pH происходит химическое окисление пирита с выделением Fe^{2+} , SO_4^{2-} и H^+ [13], в присутствии O_2 железо двухвалентное окисляется до трехвалентного. При этом постепенно возрастает кислотность вод и увеличивается активность ионов Fe^{3+} . Ацидофильные микроорганизмы убыстряют окисление пирита, что приводит к образованию кислых шахтных вод [13]. Кислые шахтные воды насыщены тяжёлыми металлами, микроэлементами и сульфатами, обладают сильной кислотностью ($\text{pH} = 2,5-3$) [14]. Поэтому угольные отвалы являются источниками загрязнения окружающей среды.

Естественное восстановление растительного покрова на угольных отвалах происходит медленно вследствие высокой кислотности, вызванной окислением сульфидных минералов вскрышных пород, недостатка питательных веществ и неблагоприятного механического состава породы. Рекультивация значительно сокращает время формирования почвенного и растительного покрова на отвалах. Рекультивация угольных отвалов приводит к повышению величин рН почвы от ультракислых (рН–Н₂O 2,7) к нейтральным (рН–Н₂O 6,4) [15]. Изменение кислотности способствует восстановлению растительности, что улучшает качество почвы за счет увеличения количества органических и питательных веществ (NPK) в почве. Согласно данным [16–18] на более старых участках рекультивации увеличились как плотность растительного сообщества, так и биоразнообразие растений.

Формирование почвы на отвалах отходов угольной добычи препятствует распространению загрязняющих веществ в окружающую среду [19, 20]. Рекультивация отвалов и нарушенных земель, а также восстановление растительности и почвы необходимы для сохранения природной среды и предотвращения негативных последствий природопользования [21, 22].

Кизеловский угольный бассейн (КУБ) расположен в восточной части Пермского края (рис. 1) и занимает площадь около 1500 км² [7]. На территории КУБа проведено тщательное обследование поверхностных вод и донных отложений [7, 8, 23]. Однако современное состояние почв отвалов КУБа изучено недостаточно. Часть угольных отвалов КУБа рекультивирована, но масштабных научных исследований не проводилось. После закрытия шахт были предприняты попытки исследования почв, образованных на отвалах [24, 25].

Однако это были разовые исследования, и они не включали диагностику и классификацию, а также многие химические характеристики.

Целью работы является изучение химико-экологических свойств антропогенных почв, образовавшихся в результате рекультивации угольных отвалов, классификация образовавшихся почв, оценка эффективности рекультивации с использованием индекса NDVI и фитотестирования.

Материалы и методы

Описание территории исследования

Район исследования входит в состав Уральской геохимической провинции элювиально-трансслювиальной области остаточных горных массивов западного склона Среднего Урала. По ландшафтному районированию территория исследования относится к Верхнеяйвинскому высокому грядово-увалистому ландшафту на палеозойских карбонатных и частично терригенных породах. Климат умеренно-континентальный, среднегодовое количество осадков 700 мм. В системе современного почвенно-экологического районирования территория КУБа относится к Западному предгорному району тяжелосуглинистых подзолистых, дерново-подзолистых и заболоченных почв. Район исследования относится к средне- и южнотажным предгорным пихтово-еловым и елово-пихтовым лесам.

Подземная добыча угля продолжалась с конца XVIII до конца XX в.; шахты были закрыты в начале 2000-х годов. На территории КУБа около 100 породных отвалов [7]. По данным спутниковых снимков 2021 г. площадь отвалов достигла 260 га. За время работы шахт накоплено свыше 35 млн м³ пород. Литология

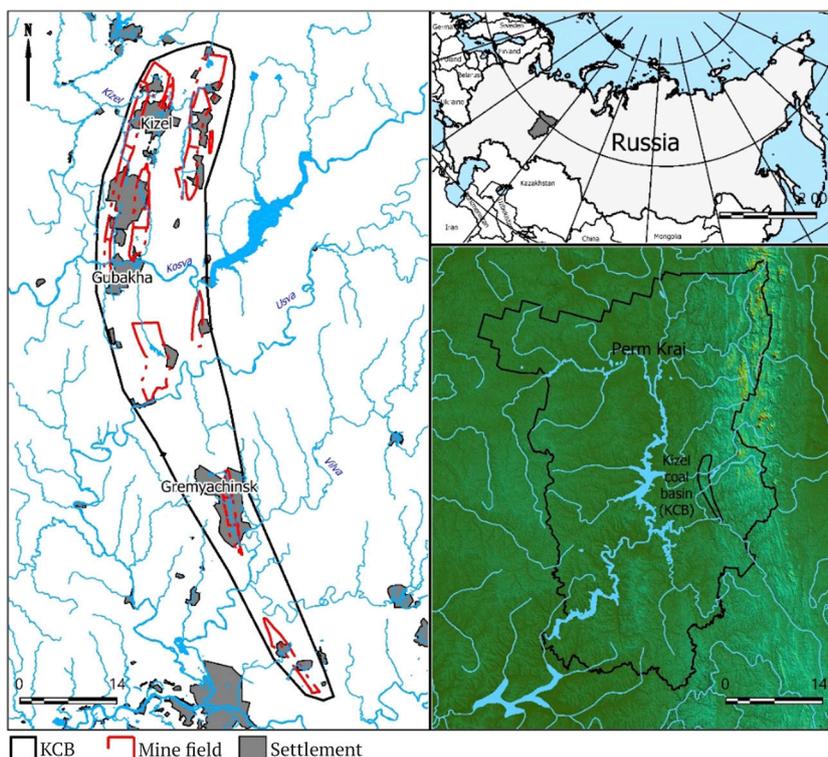


Рис. 1. Географическое положение Кизеловского угольного бассейна

угленосной толщи, технология добычи и складирования, а также возраст отвалов определили неоднородность породы отвалов, в которых установлено около 60 минералов [7]. Отвалы состоят из аргиллитов, алевролитов, песчаников, известняков, угля, пирита, содержат древесину и металлические предметы [26].

Отбор проб почвы

В летний период 2021 и 2022 гг. были отобраны пробы почв с трех рекультивированных отвалов (рис. 2). Глубина прикопок составила 30 см. Большое количество каменистого материала затрудняло отбор с большей глубины. Пробы почв были отобраны из центральной части отвала, поверхность которого была выровнена перед рекультивацией. На площади 5×5 м были заготовлены три прикопки и отобраны пробы с глубин 0–10, 10–20 и 20–30 см. Предварительно в местах отбора каждой пробы почвы поверхность очищалась от растительного покрова. Отбор проб из прикопок осуществлялся с помощью лопатки из нержавеющей стали. Образцы почв с каждого отвала с соответствующих глубин были смешаны. Почва упаковывалась в полиэтиленовые пакеты, маркирован-

ные записками с шифром пробы, датой и местом отбора. Масса объединенной пробы почвы составляла не менее 1 кг. В качестве фоновых проб смешанного леса были взяты образцы дерново-подзолистой почвы.

Прикопка 1 заложена на отвале шахты «Северная», пос. Шахта (рис. 2(1)) (59° 4' 58.62" N 57° 40' 59.29" E). Отвал был рекультивирован в начале 2000-х годов путем выравнивания и добавления гашеной извести в верхний слой. В настоящее время отвал ровный.

Прикопка 2 заложена на отвале шахты «Центральная», пос. Углеуральский (рис. 2(2)) (58° 56' 54.31" N 57° 36' 15.50" E). В 2016 г. отвал был рекультивирован путем выравнивания и засыпки глинистым материалом толщиной 0,3–0,5 м. На отвале очагово наблюдаются насыпи строительного мусора.

Прикопка 3 заложена на отвале шахты «Гореловская», пос. Шумихинский (рис. 2(3)) (58° 45' 21.25" N 57° 40' 17.25" E). В 2018 г. отвал был рекультивирован путем выравнивания и засыпки глинистым материалом толщиной около 0,3 м.

В качестве фоновых проб отобраны образцы дерново-подзолистой почвы во вторичном мелколиственном лесу.

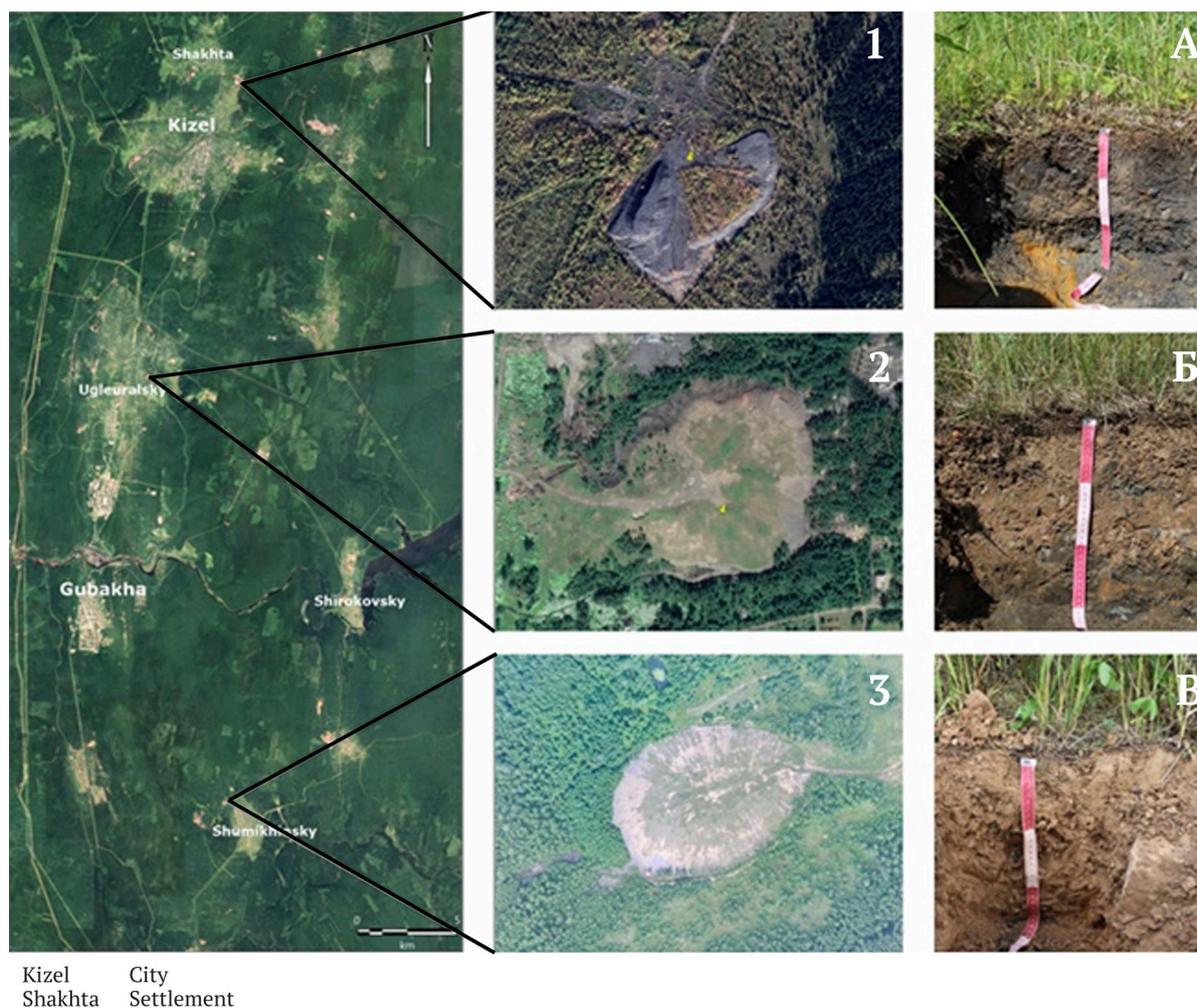


Рис. 2. Место отбора проб и профили почв:

1 – отвал шахты Северная; А – эмбриозем дерновый; 2 – отвал шахты Центральная; Б – литострат глинистый № 1; 3 – отвал шахты Гореловская; В – литострат глинистый № 2



Методы исследования

Актуальная и обменная кислотность в пробах почвы определена потенциометрическим методом. Гидролитическая кислотность – методом Каппена (в вытяжке 1М CH_3COONa), основанном на титровании 1 н щелочью в присутствии фенолфталеина. Обменную кислотность, обменный алюминий и обменный водород по методу Соколова, основанного на обработке почвы раствором 1М KCl , с последующим титрованием одной части щелочью для обнаружения суммы обменных алюминия и водорода, другая часть вытяжки титруется щелочью с добавлением фторида для определения ионов водорода. Определение кислотности почв в перекиси водорода проведено для окисления сульфидных минералов, присутствующих в отвалах; рН с перекисью ниже 2,5 указывает на наличие сульфидных минералов.

Содержание органического вещества определено спектрофотометрическим методом по ГОСТ 26213–91, емкость катионного обмена (ЕКО) по методу Бобко-Аскинази-Алешина (ГОСТ 17.4.4.01–84), содержание обменного кальция и обменного (подвижного) магния определяли комплексонометрическим титрованием по ГОСТ 26487–85; содержание подвижной серы определяли турбидиметрическим методом по ГОСТ 26490–85, подвижное железо – спектрофотометрическим методом с о-фенантролином по ГОСТ 27395–87; сульфат ионы – турбидиметрическим методом по ГОСТ 26426–85. Подвижные фосфаты и калий определены методом Кирсанова, основанном на экстракции подвижных фосфатов и калия из почвы 0,2М раствором HCl . Далее определяли подвижные фосфаты в виде синего фосфорно-молибденового комплекса на фотоэлектроколориметре, подвижный калий – на пламенном фотометре. Содержание подвижного калия и фосфатов в почвах отвалов оценивали по критериям, описанным в работе [27].

Биологическая активность почв исследована по патенту¹. Фитотестирование верхних слоев почв отвалов (0–10 см) проводили с использованием кресс-салата и овса. Кресс-салат выращивали на почвах отвалов и на фоновой почве в течение 7 дней, овес – в течение 10 дней. Высота и масса растений измерялась в 25-кратной повторности. Снижение показателей кресс-салата на 10–30% свидетельствует об удовлетворительном состоянии почвы, на 30–50% – о неудовлетворительном, при снижении более 50% – об экологически опасном состоянии. В качестве контроля использовали растения, выращенные на вермикулите с питательным раствором Кнопа (1 г/л $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, 0,25 г/л KH_2PO_4 , 0,25 г/л MgSO_4 , 0,125 г/л KCl , 0,0125 г/л FeCl_3).

Для расчета индекса NDVI на территории отвалов использовались снимки Sentinel-2 (литострат 2) и Landsat 7,8 (эмбриозем и литострат 1) за 2000, 2007, 2014, 2018, 2020 и 2023 гг. Необходимые космические снимки и спектральные каналы получены с помощью сервиса EOS LandViewer.

Индекс NDVI (нормализованный относительный индекс растительности) является показателем количества активной биомассы и вычисляется как отношение разности ближней инфракрасной и красной зоны спектра к их сумме. Значения индекса NDVI варьируются в диапазоне от –1 до +1 и позволяют определить, насколько сильно развита растительность в период вегетации. Отрицательные значения индекса на практике чаще всего соответствуют водоемам, облакам или застройке. Низкие положительные значения (от 0 до 0,3) говорят либо о полном отсутствии растительности (примерно от 0 до 0,1), либо о редкой кустарниковой или луговой растительности (примерно до 0,3). Значения в диапазоне от 0,3 до 0,5 можно отнести к умеренной растительности, значения индекса от 0,5 до 1 свидетельствуют о наличии густой растительности, чаще представленной лесными насаждениями.

Отслеживание динамики индекса на территории рекультивируемых отвалов позволяет судить об успешности проведенной рекультивации.

Индекс рассчитывался с помощью инструмента Raster Calculator набора инструментов Spatial Analyst в программе ArcMap 10.4. Для полученных растров с целью улучшения визуального отображения использовался метод передискретизации кубической свертки.

Статистические показатели, такие как среднее значение и коэффициент вариации (CV), рассчитывали с использованием программного обеспечения STATISTICA 7 и MS Excel. Для статистической обработки полученных данных использовались регрессионный и корреляционный анализы с доверительной вероятностью 95%. Образцы почвы по агрохимическим параметрам сравнивали с использованием дисперсионного непараметрического метода (критерий Краскала–Уоллиса). Значимыми различия между сравниваемыми средними значениями считались с уровнем достоверности 95% и выше ($P < 0,05$). Достоверность различий между высотой и массой растений оценена по критерию Стьюдента ($P < 0,05$).

Результаты

Классификация почв и изменения растительности

Фоновые почвы района исследований – зональные дерново-подзолистые суглинистые почвы. В связи с эксплуатацией отвалов естественный почвенный покров был преобразован. В целом почвенный покров отвалов неоднороден. На отвалах образовались техногенные почвы или техногенные поверхностные образования (ТПО).

Эмбриозем дерновый идентифицировали на отвале шахты «Северная» по классификации, предложенной в [28]. В соответствии с World Reference Base for Soil Resources (WRB) данную почву можно отнести к Epileptic Technosol (Densic, Carbonic, Skeletic) (см. рис. 2, А). Почва с поверхности имеет темно-серую окраску, под дерниной слой мощностью 2 см, характеризующийся комковатой структурой, ниже залегает плотный материал вперемешку с камнями разного размера, в верхних 10 см отмечено содержание мелкозема. Растительность на шахте «Северная»

¹ Еремченко О.З., Митракова Н.В. Способ оценки биологической активности и токсичности почв и техногенных почвогрунтов: патент РФ. 2017. Бюл. № 15. № 2620555.



имеет проективное покрытие около 25%. Древесная растительность представлена 10–15-летними березами (*Betula*). Всего встречается 9 видов растений, в том числе иван-чай узколистный (*Chamaenerion angustifolium*), подмаренник северный (*Galium Boreale*), земляника зеленая (*Fragaria viridis*), кукушкин лен обыкновенный (*Polytrichum commune*), пырей ползучий (*Elytrigia repens*), тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium*), осока (*Carex*) и манжетка обыкновенная (*Alchemilla vulgaris*) (табл. 1).

По данным WRB литострат глинистый, диагностированный на отвале шахты «Центральная», классифицируется как Spolic Epileptic Technosol (Loamic, Densic, Skeletic) (см. рис. 2, Б). В литострате отсутствует выделение на горизонты или слои, обильны камни и уголь (около 40%), до глубины 10 см комковатая структура и корни травянистых растений. Почва плотная, глинистая, буровато-коричневой окраски. Растительность отвала шахты «Центральная» представлена 20 видами

из семейств *Gramineae*, *Asteraceae*, *Rosaceae*, *Rubiaceae*, *Fabaceae*, *Plantainaceae*, *Cyperaceae* (см. табл. 1). Проективное покрытие составляет около 35%.

Глинистый литострат диагностирован также на отвале шахты «Гореловская». По данным WRB эту почву также можно классифицировать как Spolic Epileptic Technosol (Loamic, Densic, Skeletic) (см. рис. 2, В). Почва имеет светло-коричневую окраску, почвенные агрегаты глыбистые, гранулометрический состав глинистый. В нижней части профиля почва влажная, пластичной консистенции. На Гореловском отвале растительность представлена 19 видами. Тимофеевка луговая (*Phleum pratense*) и клевер красный (*Trifolium pratense*) являются доминирующими видами, единично встречаются растения 17 видов из семейств *Gramineae*, *Fabaceae*, *Asteraceae*, *Caryophyllaceae*, *Onagraceae*, *Ranunculaceae* и *Rubiaceae* (см. табл. 1). Проективное покрытие составляет около 50%.

Таблица 1

Список сосудистых растений на рекультивированных отвалах

Семейство	Название вида	Отвал ш. Северная	Отвал ш. Центральная	Отвал ш. Гореловская
<i>Asteraceae</i>	<i>Achillea millefolium</i>	+	++	+
<i>Rosaceae</i>	<i>Alchemilla vulgaris</i>	+	++	–
<i>Asteraceae</i>	<i>Artemisia absinthium</i>	–	–	+
<i>Asteraceae</i>	<i>Artemisia vulgaris</i>	–	+	–
<i>Gramineae</i>	<i>Brōmus inermis</i>	–	++	–
<i>Asteraceae</i>	<i>Carduus crispus</i>	–	–	+
<i>Cyperaceae</i>	<i>Cárex sp</i>	++	+	–
<i>Asteraceae</i>	<i>Centaurea scabiosa</i>	–	–	+
<i>Onagraceae</i>	<i>Chamaenerion angustifolium</i>	+	–	+
<i>Asteraceae</i>	<i>Cichórium íntybus</i>	–	–	+
<i>Asteraceae</i>	<i>Cirsium arvense</i>	–	+	–
<i>Gramineae</i>	<i>Dáctylis glomeráta</i>	–	+	–
<i>Gramineae</i>	<i>Elytrigia répens</i>	+	+	–
<i>Gramineae</i>	<i>Festuca pratensis</i>	–	+	–
<i>Rosaceae</i>	<i>Fragária víridis</i>	+	+	–
<i>Rubiaceae</i>	<i>Galium boreale</i>	+	+	+
<i>Hypericaceae</i>	<i>Hypericum perforatum</i>	–	+	+
<i>Fabaceae</i>	<i>Lótus corniculátus</i>	–	+	+
<i>Fabaceae</i>	<i>Medicago falcata</i>	–	+	+
<i>Fabaceae</i>	<i>Medicágo satíva</i>	–	+	–
<i>Fabaceae</i>	<i>Melilótus officinális</i>	–	–	+
<i>Gramineae</i>	<i>Phleum pratense</i>	–	+	+++
<i>Asteraceae</i>	<i>Picris hieracioides</i>	–	–	+
<i>Gramineae</i>	<i>Poa praténsis</i>	–	+	+
<i>Polytrichaceae</i>	<i>Polytrichum commúne</i>	+	–	–
<i>Gramineae</i>	<i>Puccinellia distans</i>	–	–	+
<i>Ranunculaceae</i>	<i>Ranunculus repens</i>	–	–	+
<i>Caryophyllaceae</i>	<i>Siléne vulgáris</i>	–	–	+
<i>Asteraceae</i>	<i>Tanacétum vulgáre</i>	–	+	+
<i>Fabaceae</i>	<i>Trifolium praténse</i>	н/д	н/д	+++
<i>Plantaginaceae</i>	<i>Veronica teucrium</i>	н/д	+	н/д
<i>Fabaceae</i>	<i>Vícia crácca</i>	н/д	+	н/д
<i>Betulaceae</i>	<i>Bétula péndula</i>	+	–20	–19

На основе спутниковых снимков Sentinel-2 и Landsat 7.8 выявлены изменения растительности с помощью индекса NDVI (рис. 3–5). Сукцессию на угольных отвалах рассматривали в течение нескольких временных периодов: начальный период (отвал без изменений), несколько лет после рекультивации и 2023 г.

Для отвала шахты «Северная» рассмотрены четыре периода наблюдений (см. рис. 3): исходное состояние отвала, два года после рекультивации, семь лет после рекультивации и современное состояние. Индекс NDVI на территории отвала шахты «Северная» в

июне 2000 г. (до рекультивации) составлял около 0,3. После проведения рекультивации индекс NDVI увеличился до 0,5–0,6, что свидетельствует о появлении устойчивого растительного покрова.

В июне 2014 г. (до рекультивации) индекс NDVI практически для всех участков отвала шахты «Центральная» колебался от 0,1 до 0,3, что свидетельствует об отсутствии какой-либо растительности (см. рис. 4). В течение 9 лет большую часть площади отвала заняла кустарниковая растительность, о чём говорит значение индекса NDVI в районе 0,4,

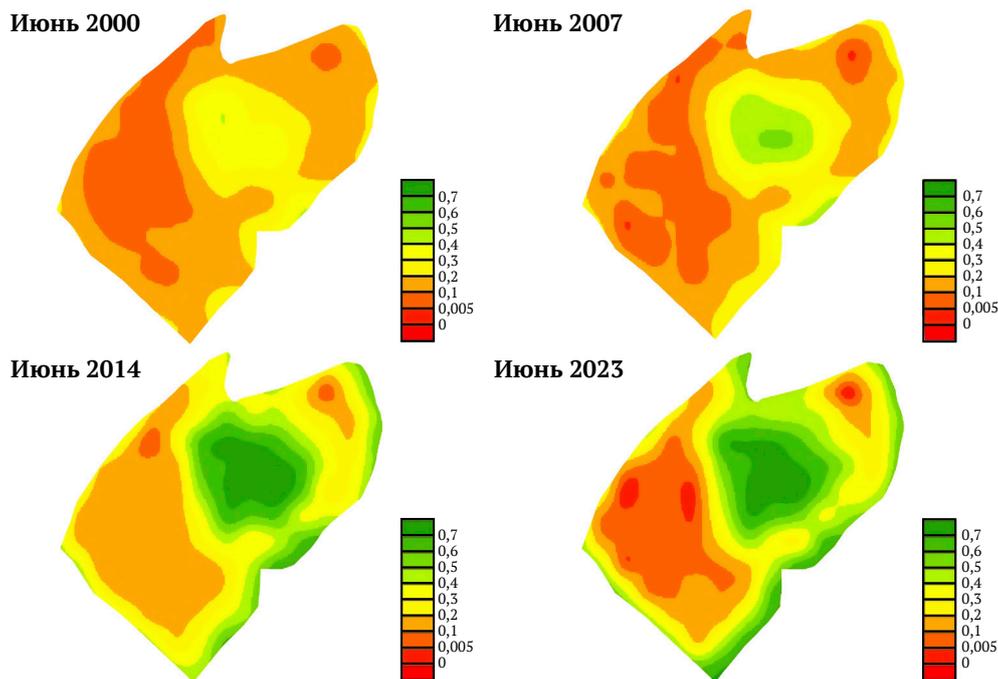


Рис. 3. Индекс NDVI для отвала шахты «Северная»

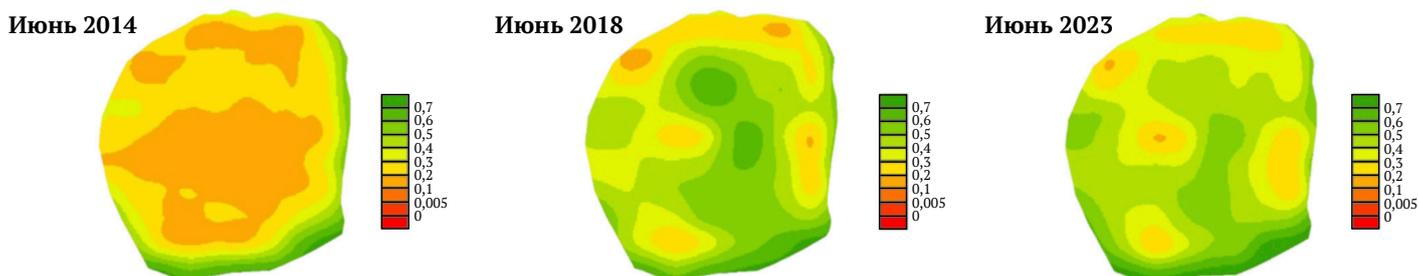


Рис. 4. Индекс NDVI для отвала шахты «Центральная»

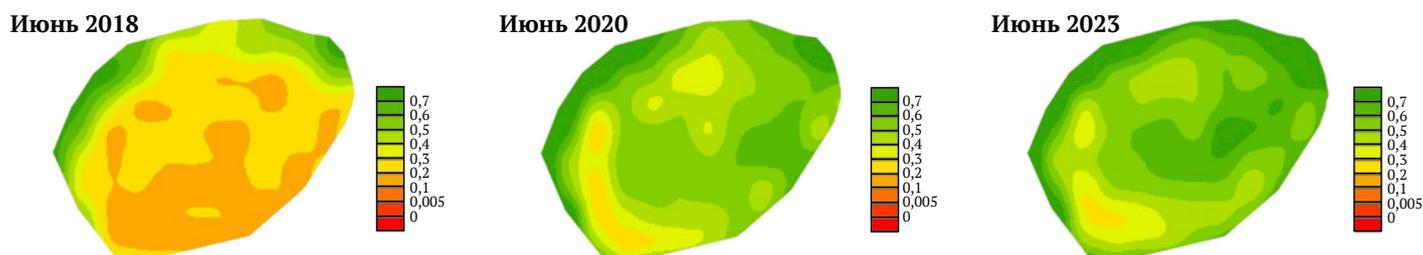


Рис. 5. Индекс NDVI для отвала шахты «Гореловская»



На отвале шахты «Гореловская» в течение 5 лет после рекультивации наблюдался рост значений индекса NDVI от 0,1–0,3 до 0,4–0,55 и выше 0,6 на отдельных участках (см. рис. 5). Динамика индекса NDVI по всем трем отвалам свидетельствует об успешности рекультивации и возникновения устойчивого растительного покрова.

Химические свойства почвы

Поверхностные слои литострата 1 и эмбриозема характеризуются нейтральной реакцией, pH–H₂O составило 6,8 и 7,9 соответственно; pH–KCl = 4,4 в литострате 1 и 5,5 в эмбриоземе (табл. 2). С глубины 20 см они становятся слабокислыми, при этом pH–H₂O снижается до 3,3 в литострате 1 и до 5,0 в эмбриоземе. Поверхностный слой литострата 2 имеет слабокислую реакцию (pH–H₂O = 6,1, pH–KCl = 4,1), кислотность увеличивается с глубиной до значений pH–H₂O = 4,5 (см. табл. 1). Нижние слои литострата 1 содержат сульфидные минералы, на что указывает pH с перекисью водорода (pH–H₂O₂ = 1,98) (см. табл. 2). Это объясняется перемешиванием нижнего слоя почвенного материала и верхнего слоя отвала в результате физической и химической миграции вещества.

Для литострата 2 характерна наибольшая обменная кислотность из всех почв отвалов, она обусловлена тем, что почва образована из срединных горизонтов местных глинистых почв. Гидролитическая кислотность литострата 1 и эмбриозема значительно ниже, чем у фоновой (см. табл. 2). Это связано с тем, что почвы отвалов нейтральные и слабощелочные. Результаты теста Краскела–Уоллиса показали, что кислотность эмбриозема отличается от кислотности фоновой почвы и литостратов.

Содержание подвижного железа в почвах отвалов в 1,5–2 раза ниже, чем в фоновой почве (см. табл. 2). В водных вытяжках почв преобладают сульфат-ионы, их содержание максимально в литострате 1. Увеличение содержания подвижной серы в литостратах с глу-

биной связано с наличием вскрышных пород отвала на глубине 20–30 см. Содержание подвижной серы в эмбриоземе снижается с глубиной, тогда как в литостратах увеличивается.

Содержание органического вещества варьирует в зависимости от почвы и слоев (табл. 3). Наибольшее содержание органического вещества характерно для эмбриозема. Обилие угля в нижнем слое литострата 1 обуславливает высокое содержание органического вещества, в вышележащих слоях литострата 1 содержание органического вещества в 2–3 раза ниже. По сравнению с литостратом 1 и эмбриоземом литострат 2 имеет самое низкое содержание органического вещества.

Емкость катионного обмена в почвах в целом средняя, с максимальными значениями в верхнем 10-сантиметровом слое. Поглотительная способность фоновой почвы несколько ниже, что, по-видимому, связано с обменными катионами кальция и магния. Содержание обменного кальция в почвах отвалов достоверно не отличается и снижается с глубиной.

Содержание фосфатов в почвах отвалов ниже фоновой почвы и классифицируется как «низкое» по шкале Кирсанова (см. табл. 3). Содержание калия подвижного максимально в литострате 1 и минимально в эмбриоземе. Содержание питательных веществ в почве зависит от времени почвообразования и растительности. На отвале шахты Центральная на литострате 1 обнаружено наибольшее разнообразие видов травянистых растений, которые могут обеспечивать наибольшее количество питательных веществ. Все почвы имеют одинаковое содержание азота, за исключением литострата 2.

Верхние слои почв отвалов обладают более благоприятными свойствами для тест-культур, чем фоновая почва (рис. 6). При этом кресс-салат, выращенный на литострате 1 и эмбриоземе, показал лучшие результаты по высоте и массе по сравнению с контролем, выращенным на вермикулите.

Таблица 2

Химические свойства почв

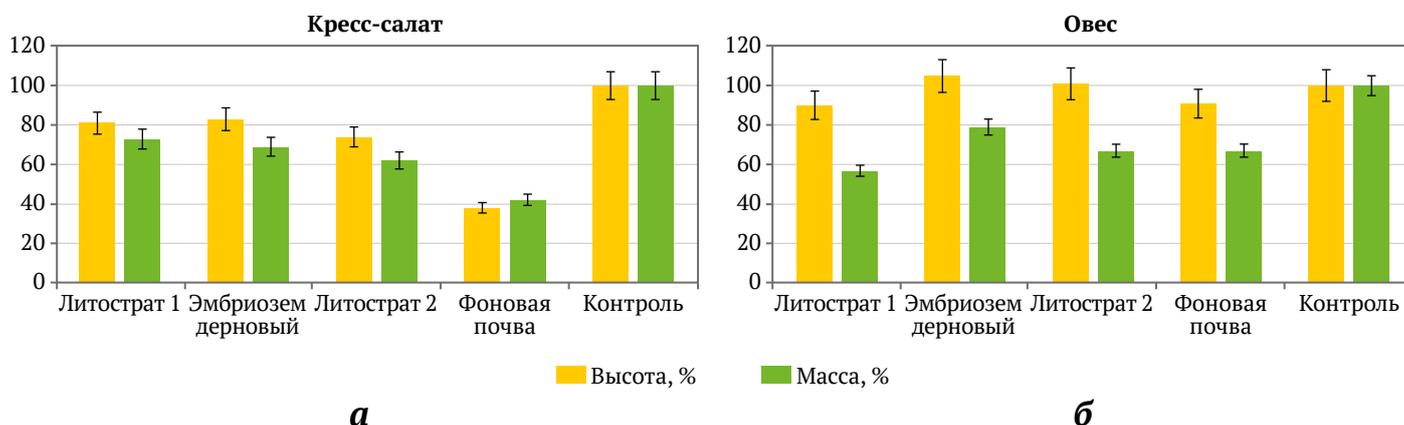
Параметры	Глубина, см	pH–H ₂ O	pH–H ₂ O ₂	pH–KCl	H _{гк} [*]	OK ^{**} (Al ³⁺ + H ⁺)	Al _{exch}	Fe _{mobile}	S _{mobile}	SO ₄ ²⁻
Эмбриозем дерновый	0–10	7,9	5,47	6,9	1,2	0	0,05	90	211,0	384,0
	10–20	7,4	5,41	6,3	1,2	0	0,05	220	163,0	480,0
	20–30	5,0	3,83	4,3	2,5	0,06	0,05	110	53,6	480,0
Литострат 1	0–10	6,8	4,41	5,3	3,9	0,08	0,05	250	17,0	312,0
	10–20	6,1	4,04	4,7	4,7	0,07	0,05	200	109,0	288,0
	20–30	3,3	1,97	2,6	16,3	2,33	3,98	260	253,0	816,0
Литострат 2	0–10	6,1	4,10	4,0	4,2	0,60	0,35	70	5,19	168,0
	10–20	5,1	3,80	3,7	15,2	8,40	9,37	110	20,8	240,0
	20–30	4,5	3,30	3,5	21,3	13,60	14,75	250	93,8	230,0
Фоновая дерново-подзолистая почва	0–10	4,5	3,71	3,5	26,4	5,00	43,00	430	12,90	240,0
	10–20	4,6	3,88	3,5	21,4	5,90	52,00	430	4,60	240,0
	20–30	4,7	4,05	3,6	20,8	5,90	52,00	360	0,20	240,0

Примечание: *H_{гк} – гидролитическая кислотность, **OK – обменная кислотность.

Таблица 3

Агрохимические свойства почв

Параметры	Глубина, см	Органическое вещество	Са _{обменный}	Mg _{обменный}	ЕКО	К _{подвиж}	P ₂ O ₅ подвиж	N _{общий}
		%	ммоль/100 г			мг/100 г		
Эмбриозем дерновый	0–10	12,1	5,75	0,56	37,0	7,0	2,5	311
	10–20	7,7	6,06	0,56	22,0	7,2	0,7	143
	20–30	9,2	4,25	1,00	19,0	2,8	0,09	70
Литострат 1	0–10	2,43	10,00	1,25	23,0	20,5	2,2	166
	10–20	3,11	7,60	1,13	24,0	10,4	3,1	93
	20–30	8,90	1,75	0,50	27,0	5,3	0,09	143
Литострат 2	0–10	1,04	16,75	6,25	27,0	10,4	3,0	47
	10–20	0,81	5,62	3,62	24,0	10,8	1,9	48
	20–30	1,01	4,75	1,12	28,0	12,0	3,0	49
Фоновая дерново-подзолистая почва	0–10	5,04	3,25	1,25	13,0	15,4	29,7	187
	10–20	5,07	2,25	1,00	21,0	10,7	22,6	240
	20–30	6,10	2,75	1,25	19,0	8,8	7,5	228


Рис. 6. Фитотестирование верхних слоев почв

Овес, выращенный на вермикулите (контроль), имел такую же высоту, как и растения, выращенные на почвах отвалов (рис. 6, б). Однако масса растений овса, выращенных на контроле, достоверно превышала массу растений, выращенных на почвах отвалов и фоновой почве.

Обсуждение

Литостраты образовались в результате покрытия выположенной вершины угольного отвала слоем глинистого материала, который, судя по всему, представлен нижними горизонтами или материнской породой местных почв. Об этом свидетельствует схожий гранулометрический и агрегатный состав. На почвенных агрегатах (педях) наблюдается железистая пленка на глубине до 20 см. Глубина профиля литостратов около 30–40 см, что обусловлено мощностью отсыпки глины, крутизной склона отвала и степенью измельченности вскрышной породы отвала.

Разницу в кислотности между литостратами можно объяснить тем, что рекультивация литострата 2 завершилась на несколько лет позже и на отвале шахты

«Центральная» остался строительный мусор от прежних объектов горного хозяйства, что потенциально может привести к нейтрализации литострата 1. Однако сильная кислотность нижнего слоя литострата 1 обусловлена наличием сульфидов во вскрышных породах отвала.

Эмбриозем образовался на измельченных вскрышных породах предварительно разровненного угольного отвала. Для создания благоприятных условий для роста растений в поверхностный слой отвала добавляли гашеную известь, поэтому почва слабощелочная. Использование извести при рекультивации отвалов является достаточно распространенной практикой, как и использование активного ила в качестве плодородного слоя.

Так, совместное использование свежескопанных и компостированных биологических веществ помогло нейтрализовать активную и обменную кислотность в почвах и улучшить плодородие почвы на территории медного рудника [15]. На биологическом этапе рекультивации шахты «Капитальная» (Кузнецкий угольный бассейн) в качестве плодородного слоя использовали ил городских очистных сооружений [29].



В почвах отвалов КУБа происходят первичные почвообразовательные процессы. Растительный покров, корни растений, ежегодное образование отмерших растительных остатков способствуют разрыхлению верхнего слоя почвы и накоплению органического вещества.

Подобные типы техногенных почв формируются и в других регионах в сходных условиях – угледобыче, климате и растительности [3, 30, 31]. Техногенные почвы отвалов являются педогенно незрелыми почвами. Они наследуют отрицательные физико-химические свойства отвалов угольных шахт [32], а также содержат большое количество артефактов.

Относительно высокая подвижность железа в фоновой почве по сравнению с почвами отвалов может быть обусловлена кислотностью и высоким содержанием гидроксидов железа в глинистых минералах дерново-подзолистой почвы [33, 34].

Низкое содержание органического вещества в литострате 2 обусловлено отсутствием внесения удобрений при рекультивации. Также его органогенный слой не успел сформироваться из-за незрелости фитocenоза. В литострате 1 высокое содержание органического вещества потенциально можно объяснить наличием угольных включений по всему профилю, а также устойчивым травянистым сообществом. Присутствием частиц угля во вскрышных породах [35] можно объяснить высокое содержание органического вещества в эмбриоземе (7,7–12,1%) и в нижнем слое литострата 1 (8,9%).

Количество общего азота и подвижного калия возрастает с увеличением возраста литострата, что подтверждается в [36, 37]. В целом содержание общего азота в литостратах значительно ниже, чем в фоновой дерново-подзолистой почве и эмбриоземе.

Коэффициент вариации (КВ) объясняется влиянием техногенно-антропогенных процессов на почвообразование. Следует отметить, что коэффициент вариации для обменной кислотности, органического вещества, общего железа и подвижной серы в литостратах превышает 40%. Для эмбриозема диапазон КВ перечисленных показателей значительно ниже. Это связано с однородностью почвообразующего материала эмбриозема, тогда как литостраты – это слой глины, перемешанный с верхним слоем отвала. В результате свойства нижних слоев литостратов не соответствуют ни качествам вскрышной породы, ни глинистому материалу. Коэффициент вариации практически для всех химических показателей фоновой почвы не превышает 25%, за исключением содержания подвижной серы, где КВ = 110%, что соответствует значениям коэффициента вариации для подвижной серы в литостратах и эмбриоземе.

Корреляционный анализ выявил прямую и достоверную связь между гидролитической кислотностью, содержанием обменного алюминия и подвижного железа. Источниками железа в исследованных техногенных почвах являются минералы зональных почв и вскрышные породы отвалов. Количество подвижных фосфатов пропорционально вышеуказанным показателям. Это может быть связано со способностью

фосфатов образовывать комплексы с алюминием и железом в кислых условиях. В то же время была обнаружена отрицательная корреляция между поглощательной способностью и подвижным железом.

По ростовым показателям овса наилучшее биологическое состояние показал эмбриозем, поскольку он имеет нейтральную реакцию и характеризуется высоким содержанием органического вещества.

Рекультивация угольных отвалов путем создания глинистого экрана или внесения удобрений для стимулирования роста травянистой или древесной растительности имеет решающее значение для предотвращения водной и ветровой эрозии, а также распространения загрязняющих веществ. Это также важно для формирования устойчивых растительных сообществ. Химические свойства техногенных почв существенно различаются по профилю по сравнению с фоновой почвой на исследуемой территории и между собой.

Рекультивационные мероприятия на отвале шахты «Северная», проведенные 25 лет назад, привели к возникновению к настоящему времени эмбриозема дернового, при этом эволюция почвы продолжается. Рекультивация с добавлением гашеной извести обеспечила снижение кислотности до нейтрального уровня, а также высокое содержание органических веществ и поглощательной способности. Поскольку на образовавшихся почвах сложилось устойчивое травянисто-древесное растительное сообщество, этот метод рекультивации можно считать эффективным. Модификация питательной среды путем добавления золы, шлака и осадка сточных вод была изучена на угольных отвалах Бразилии, и этот метод также показал многообещающие результаты при выращивании овса щетинистого (*Avena strigosa*) и кукурузы (*Zea mays*) [38].

Засыпка отвалов глинистым материалом нейтрализует сульфидные минералы вскрышных пород вследствие создания экрана, предотвращающего контакт воды и кислорода с минералами, и образования кислых шахтных вод. Изученные литостраты формировались одинаково, но различались по возрасту. Оценить эффективность рекультивации путем засыпки отвала глиной можно, учитывая первичное состояние грунта отвала (литострат 2) и более зрелого грунта (литострат 1). Число видов растений в растительном сообществе со временем увеличивается. Многовидовое травянистое сообщество способствует накоплению органического вещества в верхнем слое почвы и образованию почвенных агрегатов, что улучшает физические свойства отвальных почв, снижает кислотность и увеличивает содержание NPK.

В работе [39] почвы сравнивались через 5, 10 и 25 лет после добычи. В почвах деградированных земель угольных шахт запасы углерода и азота увеличивались с возрастом рекультивации. Это также может быть связано с попаданием органических веществ из отвалов. Физические свойства почвы со временем улучшились. В почве старого отвала преобладала мелкая фракция. В [18] авторы обнаружили увеличение биоразнообразия растений на давно освоенных территориях. В [17] исследователи отметили благотворное



влияние травянистых растений на физико-химические свойства почв при рекультивации горнодобывающих территорий. Такие свойства почв рекультивированных отвалов, как содержание органического вещества, содержание азота и фосфора, улучшались со временем после проведенной рекультивации [40].

В целом рост растений на сульфидных угольных отвалах после рекультивации предотвращает ветровую и водную эрозию, самовозгорание и распространение загрязняющих веществ [41]. По результатам сравнения литостратов разного возраста в образовавшуюся почву при рекультивации необходимо вносить органические и минеральные удобрения. Примененные агромероприятий (формирование почвенного слоя для роста растений, внесение удобрений, посадка травянистых культур) способствует достижению наилучших результатов [42].

Выводы

На исследованных рекультивированных отвалах Кизеловского угольного бассейна выявлены различные типы почв. Классификация основана на реализованных рекультивационных мероприятиях и техногенных почвообразующих породах. Глинистые литостраты, или Spolic Epileptic Technosol (Loamic, Densic, Skeletic), выявлены на отвалах, рекультивированных путем выравнивания поверхности и засыпки глинистым материалом. Эмбриозем, Epileptic Technosol (Densic, Carbonic, Skeletic), образовался после выравнивания угольного отвала и внесения извести в верхний слой за почти 25-летний период.

Отсутствие горизонтов и четко выраженной структуры почвенных агрегатов, а также большое количество артефактов (обломков вскрышных пород разного размера) в почвах, образовавшихся на угольных отвалах, являются показателями их техногенной природы и молодого возраста.

Уровень кислотности литостратов колебался от кислого до нейтрального, причем чем дольше прошло время после рекультивации, тем ниже становились показатели гидролитической кислотности. Эмбриозем имеет слабощелочную реакцию, обменная кислотность отсутствует. Статистический анализ показал отсутствие различий между $pH_{\text{вод}}$ и $pH_{\text{сол}}$ литостратов и фоновой почвы, однако уровень обменной кислотности литострата 1 ниже, чем в фоновой почве и литострате 2.

Поскольку эмбриозем образовался из измельченных вскрышных пород угольных отвалов, содержание органического вещества в нем максимально. Количество органического вещества в литострате 1 превышает количество органического вещества в литострате 2, что связано с наличием угольных включений по всему профилю.

Травянистая растительность способствует формированию структуры почвы, накоплению органического вещества, обменных ионов кальция и магния и, как следствие, снижению кислотности. Содержание питательных элементов (NPK) также зависит от времени формирования почвы и разнообразия видов растений. Фитотестирование почв с использованием кресс-салата и овса показало, что почвы отвалов имеют более благоприятные экологические условия для роста растений, чем фоновая почва.

В целом рекультивация ускоряет формирование почв и устойчивых растительных сообществ на отвалах и сводит к минимуму поступление загрязняющих веществ в другие природные компоненты. Согласно индексу NDVI уже через два года после рекультивации на сульфидном отвале наблюдается устойчивая травянистая растительность. В рекультивационный период необходимо проводить такие мелиоративные мероприятия, как вспашка и внесение органических и минеральных удобрений, для создания наилучших условий для растительных сообществ.

Список литературы / References

1. Tichavsky R., Lenart J., Fabiánová A., Tolasz R. Tree-ring records of surface displacements in a coal-mining subsided region and their links to hypsometric changes and extreme precipitation. *Catena*. 2023;221(Part A):106758. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106758>
2. Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А., Мухина А.С., Мосейкин В.В. Инженерно-геологические и геоэкологические проблемы восстановления нарушенных земель при отвалообразовании на открытой угледобыче в Кузбассе. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(5):5–24. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_5_0_5
Kutepov Yu.I., Kutepova N.A., Mukhina A.S., Moseykin V.V. Geological, geotechnical and geocological problems of reclamation of land disturbed by dumping in open pit coal mining in Kuzbass. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(5):5–24. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_5_0_5
3. Bragina P.S., Tsi bart A.S., Zavadskaya M.P., Sharapova A.V. Soils on overburden dumps in the forest steppe and mountain taiga zones of the Kuzbass. *Eurasian Soil Science*. 2014;(47):723–733. <https://doi.org/10.1134/S1064229314050032>
4. Nádudvari A., Kozielska B., Abramowicz A. et al. Heavy metal- and organic-matter pollution due to self-heating coal-waste dumps in the Upper Silesian Coal Basin (Poland). *Journal of Hazardous Materials*. 2021;(412):125244. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125244>
5. Tozsın G. Hazardous elements in soil and coal from the Oltu coal mine district, Turkey. *International Journal of Coal Geology*. 2014;(131):1–6. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2014.05.011>
6. Shan Y., Wang W., Qin Y., Gao L. Multivariate analysis of trace elements leaching from coal and host rock. *Groundwater for Sustainable Development*. 2019;8:402–412. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.01.001>



7. Максимович Н.Г., Пьянков С.В. *Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения*. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет; 2018. 288 с. Maksimovich N.G., Pyankov S.V. *The Kizel Coal Basin: ecological problems and solutions*. Perm: Perm State National Research University; 2018. 288 p. (In Russ.)
8. Ushakova E., Menshikova E., Blinov S. et al. environmental assessment impact of acid mine drainage from Kizel coal basin on the Kosva Bay of the Kama Reservoir (Perm Krai, Russia). *Water*. 2022;14(5):727. <https://doi.org/10.3390/w14050727>
9. Ushakova E., Menshikova E., Blinov S. et al. Distribution of trace elements, rare earth elements and ecotoxicity in sediments of the Kosva bay, Perm region (Russia). *Journal of Ecological Engineering*. 2022;23(4):1–16. <https://doi.org/10.12911/22998993/146269>
10. Yang J., Wei H., Quan Z. et al. A global meta-analysis of coal mining studies provides insights into the hydrologic cycle at watershed scale. *Journal of Hydrology*. 2023;617(Part B):129023. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.129023>
11. Имайкин А.К., Имайкин К.К. *Гидрогеологические условия Кизеловского угольного бассейна во время и после окончания его эксплуатации, прогноз их изменений*. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет; 2013. 112 с. Imaykin A.K., Imaykin K.K. *Hydrogeological conditions of the Kizelovsky coal basin during and after the end of its operation, forecast of their changes*. Perm: Perm State National Research University; 2013. 112 p. (In Russ.)
12. Singh K.N., Narzary D. Geochemical characterization of mine overburden strata for strategic overburden-spoil management in an opencast coal mine. *Environmental Challenges*. 2021;(3):100060. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100060>
13. Welch C., Barbour S.L., Hendry M.J. The geochemistry and hydrology of coal waste rock dumps: A systematic global review. *Science of the Total Environment*. 2021;(795):148798. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148798>
14. Jiao Y., Zhang C., Su P. et al. A review of acid mine drainage: Formation mechanism, treatment technology, typical engineering cases and resource utilization. *Process Safety and Environmental Protection*. 2023;(170):1240–1260. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.12.083>
15. Fernández-Caliani J.C., Giráldez M.I., Waken W.H. et al. Soil quality changes in an Iberian pyrite mine site 15 years after land reclamation. *Catena*. 2021;(206):105538. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105538>
16. Ahirwal J., Maiti S.K. Development of Technosol properties and recovery of carbon stock after 16 years of revegetation on coal mine degraded lands, India. *Catena*. 2018;(166):114–123. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.03.026>
17. Li Y., Zhou W., Jing M. et al. Changes in reconstructed soil physicochemical properties in an opencast mine dump in the Loess Plateau Area of China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020;19(2):706. <https://doi.org/10.3390/ijerph19020706>
18. Arshi A. Reclamation of coalmine overburden dump through environmental friendly method. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 2017;24(2):371–378. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2015.09.009>
19. Rahmonov O., Czajka A., Nádudvari Á. et al. Soil and vegetation development on coal-waste dump in Southern Poland. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022;(19):9167. <https://doi.org/10.3390/ijerph19159167>
20. Lei H., Peng Z., Yigang H., Yang Z. Vegetation and soil restoration in refuse dumps from open pit coal mines. *Ecological Engineering*. 2016;(94):638–646. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.06.108>
21. Feng Y., Wang J., Bai Z. Reading Lucy Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review. *Earth-Science Reviews*. 2019;(191):12–25. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.02.015>
22. Guan Y., Wang J., Zhou W. et al. Identification of land reclamation stages based on succession characteristics of rehabilitated vegetation in the Pingshuo opencast coal mine. *Journal of Environmental Management*. 2022;(305):114352. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114352>
23. Pyankov S.V., Maximovich N.G., Khayrulina E.A. et al. Monitoring acid mine drainage's effects on surface water in the Kizel Coal Basin with Sentinel-2 Satellite Images. *Mine Water and the Environment*. 2021;(40):606–621. <https://doi.org/10.1007/s10230-021-00761-7>
24. Каракульева А.А., Кондратьева М.А. Свойства эмбриоземов угольных отвалов кизеловского бассейна. *Антропогенная трансформация природной среды*. 2018;(4):156–159. Karakulieva A.A., Kondrateva M.A. Properties of embryoses of coal mines dumps of the Kizelovsky Basin. *Anthropogenic Transformation of Nature*. 2018;(4):156–159. (In Russ.)
25. Бердинских С.Ю., Боталов В.С., Романов А.В., Зайцев А.Г. Агрехимическая характеристика верхнего слоя грунта на угольных терриконах и влияние глинования на их естественное зарастание (на примере Кизеловского угольного бассейна). В: *Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды. Сборник материалов всероссийской школы-семинара, посвященной памяти Н.Ф. Реймерса и Ф.Р. Штильмарка*. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет; 2022. С. 437–441. Berdinskikh S. Yu., Botalov V.S., Romanov A.V., Zaytsev A.G. Agrochemical characteristics of the top layer of soil on coal waste heaps and the effect of clayng on their natural overgrowth on the example of the



- Kizelovsky Coal Basin. In: *Ecological Safety in the Conditions of Anthropogenic Transformation of the Natural Environment. Collection of papers of the All-Russian School-Seminar Dedicated to the Memory of N. F. Reimers and F. R. Shtilmark*. Perm: Perm State National Research University; 2022. Pp. 437–441. (In Russ.)
26. Menshikova E., Osovetsky B., Blinov S., Belkin P. Mineral formation under the influence of mine waters (the Kizel Coal Basin, Russia). *Minerals*. 2020;10(4):364. <https://doi.org/10.3390/min10040364>
27. Мотузова Г.В., Безуглова О.С. *Экологический мониторинг почв*. М.: Академический проект, Гаудеамус; 2007.
Motuzova G.V., Bezuglova O.S. *Ecological monitoring of soils*. Moscow: Academic Project, Gaudeamus; 2007. (In Russ.)
28. Андроханов В.А. Специфика и генезис почвенного покрова техногенных ландшафтов. *Сибирский экологический журнал*. 2005;(5):795–800.
Androkhonov V.A. Specificity and genesis of the soil cover of man-made landscapes. *Siberian Journal of Forest Science*. 2005;(5):795–800. (In Russ.)
29. Некрасова А.Е., Бобренко Е.Г., Кныш А.И., Сологаев В.И. Рекультивация породного отвала ОАО «Шахта «Капитальная» Кемеровской области. *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 2016;(1):154–160.
Nekrasova A.E., Bobrenko E.G., Knych A.I., Sologae V.I. Reclamation of waste dump open joint-stock company “Mine “Capital” of the Kemerovo Region. *Vestnik of Omsk SAU*. 2016;(1):154–160. (In Russ.)
30. Uzarowicz Ł., Zagórski Z., Mendak E. et al. Technogenic soils (Technosols) developed from fly ash and bottom ash from thermal power stations combusting bituminous coal and lignite. Part I. Properties, classification, and indicators of early pedogenesis. *Catena*. 2017;(157):75–89. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.05.010>
31. Krupskaya L.T., Androkhonov V.A., Belanov I.P. Technogenic surface formations within the limits of mining-industrial system of the Dalnegorsky District of the Primorsky Krai as the reclamation site. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;459:032046. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/3/032046>
32. Filcheva E., Hristova M., Haigh M. et al. Soil organic matter and microbiological development of technosols in the South Wales Coalfield. *Catena*. 2021;(201):105203. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105203>
33. Козлова А.А., Халбаев В.Л., Айсыева Т.С. и др. Содержание различных форм железа в почвах Южного Предбайкалья. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2014;(5):56–61.
Kozlova A.A., Khalbaev V.L., Aysueva T.S. et al. Contents of different forms of iron in the soils of Southern Predbaikalye. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2014;(5):56–61. (In Russ.)
34. Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М. и др. Изучение динамики изменения содержания подвижного железа в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, мелиорируемой доломитом. *Агрохимия*. 2019;(3):44–53. <https://doi.org/10.1134/S0002188119030098>
Litvinovich A.V., Lavrishchev A.V., Bure V.M. et al. Studying the dynamics of mobile iron content in sod-podzolic light loam soil ameliorated by dolomite. *Agrochimia*. 2019;(3):44–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0002188119030098>
35. Меньшикова Е.А. Подходы к оценке техногенной формации горнопромышленных территорий. *Геология и полезные ископаемые Западного Урала*. 2020;(3):277–281.
Menshikova E.A. Technogenical formation of mining areas in the Perm region. *Geology and mineral resources of Western Urals*. 2020;(3):277–281. (In Russ.)
36. Li X., Lei S., Liu F., Wang W. Analysis of plant and soil restoration process and degree of refuse dumps in open-pit coal mining areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020;17(6):1975. <https://doi.org/10.3390/ijerph17061975>
37. Zhang N., Huang S., Lei H. et al. Changes in soil quality over time focusing on organic acid content in restoration areas following coal mining. *Catena*. 2022;(218):106567. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106567>
38. Firpo B.A., Weiler J., Schneider I.A.H. Technosol made from coal waste as a strategy to plant growth and environmental control. *Energy Geoscience*. 2021;2(2):160–166. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2020.09.006>
39. Bandyopadhyay S., Novo L.A.B., Pietrzykowski M., Maiti S.K. Assessment of forest ecosystem development in coal mine degraded land by using Integrated Mine Soil Quality Index (IMSQI): the evidence from India. *Forests*. 2020;11(12):1310. <https://doi.org/10.3390/f11121310>
40. Liu X., Bai Z., Zhou W. et al. Changes in soil properties in the soil profile after mining and reclamation in an opencast coal mine on the Loess Plateau, China. *Ecological Engineering*. 2017;(98):228–239. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.078>
41. Zheng S., Bai D.-S., Yang X. et al. Changes in soil microecology of gangue reclamation areas after 10 years of in situ restoration with herbaceous plants (*Artemisia sacrorum* and *Imperata cylindrica*) and trees (*Populus* spp.). *Ecological Engineering*. 2022;182:106719. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106719>
42. Xu D., Li X., Chen J., Li J. Research progress of soil and vegetation restoration technology in open-pit coal mine: a review. *Agriculture*. 2023;13(2):226. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020226>



Информация об авторах

Наталья Васильевна Митракова – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии техногенных ландшафтов, Естественнонаучный институт, Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-5571-7725](https://orcid.org/0000-0002-5571-7725), Scopus ID [57208284684](https://scopus.com/authorid/57208284684), ResearcherID [ABC-8334-2021](https://orcid.org/ABC-8334-2021); e-mail mitrakovanatalya@mail.ru

Елена Александровна Хайрулина – доктор географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории биогеохимии техногенных ландшафтов, Естественнонаучный институт, профессор кафедры картографии и геоинформатики, географический факультет, Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-9074-8551](https://orcid.org/0000-0002-9074-8551), Scopus ID [56029238900](https://scopus.com/authorid/56029238900), ResearcherID [J-8411-2014](https://orcid.org/J-8411-2014); e-mail elenakhay@gmail.com

Анна Александровна Перевощикова – младший научный сотрудник лаборатории биогеохимии техногенных ландшафтов, Естественнонаучный институт, Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-1769-7740](https://orcid.org/0000-0003-1769-7740), Scopus ID [57694899800](https://scopus.com/authorid/57694899800); e-mail aaperevoshchikova@yandex.ru

Наталья Витальевна Порошина – кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии техногенных ландшафтов, Естественнонаучный институт, Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-1761-6720](https://orcid.org/0000-0002-1761-6720), Scopus ID [57694163400](https://scopus.com/authorid/57694163400); e-mail navit1@yandex.ru

Елизавета Евгеньевна Малышкина – инженер-исследователь лаборатории биогеохимии техногенных ландшафтов, Естественнонаучный институт, Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-7251-7637](https://orcid.org/0000-0002-7251-7637), Scopus ID [58017742100](https://scopus.com/authorid/58017742100); e-mail thelionofcintra@gmail.com

Евгения Симоновна Яковлева – инженер-исследователь лаборатории биогеохимии техногенных ландшафтов, Естественнонаучный институт, Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID [0009-0005-5344-7361](https://orcid.org/0009-0005-5344-7361); e-mail evyakovlevaa@gmail.com

Никита Алексеевич Кобелев – инженер-исследователь лаборатории биогеохимии техногенных ландшафтов, Естественнонаучный институт, Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID [0009-0007-3129-5568](https://orcid.org/0009-0007-3129-5568); e-mail amst3rz@gmail.com

Information about the authors

Natalya V. Mitrakova – Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher at the Laboratory of Biogeochemistry of Man-made Landscapes, Natural Science Institute, Perm State National Research University, Perm, Russian Federation; ORCID [0000-0002-5571-7725](https://orcid.org/0000-0002-5571-7725), Scopus ID [57208284684](https://scopus.com/authorid/57208284684), ResearcherID [ABC-8334-2021](https://orcid.org/ABC-8334-2021); e-mail mitrakovanatalya@mail.ru

Elena A. Khayrulina – Dr. Sci. (Geograph.), Leading Researcher at the Laboratory of Biogeochemistry of Man-made Landscapes, Natural Science Institute, Professor of the Department of Cartography and Geoinformatics, Faculty of Geography, Perm State National Research University, Perm, Russian Federation; ORCID [0000-0002-9074-8551](https://orcid.org/0000-0002-9074-8551), Scopus ID [56029238900](https://scopus.com/authorid/56029238900), ResearcherID [J-8411-2014](https://orcid.org/J-8411-2014); e-mail elenakhay@gmail.com

Anna A. Perevoshchikova – Junior Researcher at the Laboratory of Biogeochemistry of Man-made Landscapes, Natural Science Institute, Perm State National Research University, Perm, Russian Federation; ORCID [0000-0003-1769-7740](https://orcid.org/0000-0003-1769-7740), Scopus ID [57694899800](https://scopus.com/authorid/57694899800); e-mail aaperevoshchikova@yandex.ru

Natalya V. Poroshina – Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher at the Laboratory of Biogeochemistry of Man-made Landscapes, Natural Science Institute, Perm State National Research University, Perm, Russian Federation; ORCID [0000-0002-1761-6720](https://orcid.org/0000-0002-1761-6720), Scopus ID [57694163400](https://scopus.com/authorid/57694163400); e-mail navit1@yandex.ru

Elizaveta E. Malyshkina – Research Engineer at the Laboratory of Biogeochemistry of Man-made Landscapes, Natural Science Institute, Perm State National Research University, Perm, Russian Federation; ORCID [0000-0002-7251-7637](https://orcid.org/0000-0002-7251-7637), Scopus ID [58017742100](https://scopus.com/authorid/58017742100); e-mail thelionofcintra@gmail.com

Evgenia S. Yakovleva – Research Engineer at the Laboratory of Biogeochemistry of Man-made Landscapes, Natural Science Institute, Perm State National Research University, Perm, Russian Federation; ORCID [0009-0005-5344-7361](https://orcid.org/0009-0005-5344-7361); e-mail evyakovlevaa@gmail.com

Nikita A. Kobelev – Research Engineer at the Laboratory of Biogeochemistry of Man-made Landscapes, Natural Science Institute, Perm State National Research University, Perm, Russian Federation; ORCID [0009-0007-3129-5568](https://orcid.org/0009-0007-3129-5568); e-mail amst3rz@gmail.com

Поступила в редакцию	13.04.2024	Received	13.04.2024
Поступила после рецензирования	08.06.2024	Revised	08.06.2024
Принята к публикации	22.06.2024	Accepted	22.06.2024