ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья

Эффективность рекультивации кислых сульфатных почв в районах угледобычи

Н.В.МИТРАКОВА✉, Е.А.ХАЙРУЛИНА, С.М.БЛИНОВ, А.А.ПЕРЕВОЩИКОВА

Естественнонаучный институт Пермского государственного национального исследовательского университета, Пермь, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Митракова Н.В., Хайрулина Е.А., Блинов С.М., Перевощикова А.А. Эффективность рекультивации кислых сульфатных почв в районах угледобычи // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 266-278. DOI: 10.31897/PMI.2023.31

Аннотация. При разработке угольных месторождений поступление кислых шахтных вод на поверхность приводит к образованию кислых сульфатных почв. С помощью агрохимических и геохимических методов изучена эффективность рекультивации почвенного покрова на участке сброса кислых шахтных вод в Кизеловском угольном бассейне, проведенная в 2005 г. с использованием щелочных отходов содового производства и активного ила. На рекультивированном участке диагностирован технозем с устойчивым фитоценозом, на нерекультивированном – дерново-подзолистая, погребенная под техногенным слоем почва с отсутствием растительности. Погребенная дерново-подзолистая почва сохраняет сильнокислую реакцию pH H_2O = 3, источником высокого содержания органического вещества (8-1,5 %) являются углистые частицы, присутствие сульфидных минералов обнаружено до глубины 40 см. Технозем имеет слабокислую реакцию pH H_2O = 5,5, содержание органического вещества из-за использования активного ила составляет 19-65 % , признаки сульфидных минералов отмечены на глубине 20-40 см. Содержание валового железа в верхних слоях технозема не изменилось (190-200 г/кг), превышение над фоном достигает 15 раз. Загрязнение тяжелыми металлами и микроэлементами отсутствует, обнаружены единичные повышенные концентрации Li, Se, B и V.

***Ключевые слова*:** добыча угля; сброс шахтных вод; кислые сульфатные почвы; технозем; рекультивация; микроэлементы; суммарный показатель загрязнения; индекс геологического накопления элементов

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, проект № FSNF-2020-0021.

Поступила: 04.11.2022 ***Принята: 02.03.2023*** ***Онлайн: 30.03.2023*** ***Опубликована: 25.04.2023***

Введение. Угледобывающее производство является ведущим фактором трансформации природной среды в районах разработки месторождений угля [1-3]. Добыча угля шахтным способом обычно сопровождается откачкой и сбросом шахтных вод, а также накоплением многотоннажных отвалов вскрышных пород [4, 5]. Угли и угленосные породы содержат большое количество сульфидной и органической серы. Например, содержание пирита во вскрышных породах может достигать 10-12 % [6]. Пирит и другие сульфиды в окислительных условиях шахтного пространства и породных отвалов химически нестабильны при воздействии воды и участии микроорганизмов [7, 8], так в шахтном пространстве и породных отвалах происходит формирование кислых вод, обогащенных сульфатами.

Сброс шахтных вод на поверхность и формирование кислых стоков породных отвалов, а также перенос частиц породных отвалов временными водными потоками приводит к техногенному воздействию на почвы прилегающих территорий [9-11]. Стоки с отвалов и изливы шахтных вод являются источниками поступления микроэлементов в поверхностные воды, донные отложения и почвы [4, 10, 12]. В результате образуются техногенные почвы с физико-химическими свойствами, не характерными для исходных почв [9], имеющие сильно кислую реакцию среды и повышенное содержание сульфатов и микроэлементов в поверхностном слое [9, 12, 13]. Депонирующая способность почв обеспечивает возможность вторичного загрязнения микроэлементами и сульфатами поверхностных и подземных вод [14].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Рекультивация отвалов и нарушенных территорий, восстановление почв и высшей растительности является важной прикладной задачей в восстановлении техногенных экосистем [15, 16].

Почвообразование в горно-промышленных районах зависит от климата и рельефа, химического состава пород отвалов, которые являются техногенной почвообразующей породой [17, 18]. Возникновение кислых сульфатных почв в угледобывающих районах происходит за счет поступления шахтных и сточных вод, обогащенных сульфатами. Вскрышные породы отвалов являются дополнительным источником органического вещества. В природных условиях образование кислых сульфатных почв приурочено к субстратам, богатым сульфидами. Так, например, сульфидизация проявляется в результате проникновения морской воды в приливные болота с анаэробными условиями и высоким содержанием органического вещества [19, 20].

Изучение техногенного почвообразования и эффективности рекультивационных мероприятий проводилось на территории Кизеловского угольного месторождения (Пермский край). Несмотря на подробное изучение поверхностных вод и донных отложений [4, 21, 22], современное состояние почв самоизливов и участков сброса кислых шахтных вод Кизеловского угольного бассейна (КУБ) практически не проводилось. В 20-х годах XXI в. были предприняты попытки исследования почв, образованных на отвалах [23, 24], однако изучение почв, образованных на стоках с отвалов и стоках шахтных вод, не проводилось даже перед проведением рекультивационных мероприятий.

Цель данной работы – исследование исходной и рекультивированной почв на участке сброса кислых вод шахты Широковская для оценки эффективности проведенных в 2005 г. рекультивационных мероприятий. Задачами являются изучение морфологических изменений почв и их классификация; изучение химических свойств почв, геохимическая оценка почв по содержанию микроэлементов.

Методы. *Описание территории исследования*. Кизеловский угольный бассейн расположен в восточной части Пермского края, его площадь 1500 км^2, протяженность – около 150 км. Добыча угля подземным способом продолжалась около 200 лет, с 1992 до начала 2000-х годов шахты были ликвидированы. На территории КУБа отмечается наличие около 100 породных отвалов. Методами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) установлено, что площадь земель, занимаемая отвалами, составляет 260 га [4]. За время работы шахт в отвалах накоплено свыше 35 млн м^3 пород. Литология угленосной толщи, технология добычи и складирования определили неоднородность минерального состава пород отвалов, в которых установлено около 60 минералов. Отвалы состоят из аргиллитов, алевролитов, песчаников, известняков, угля, пирита, могут содержать древесину и металлические предметы [25]. Многолетняя эксплуатация шахт и их ликвидация ненадлежащим образом повлекла за собой негативные последствия для поверхностных и подземных вод, почв. Самоизливы шахтных вод на поверхность и стоки с отвалов имеют сильнокислую реакцию – pH 2-3, характеризуются высокими концентрациями железа, алюминия, марганца, бериллия, содержание которых в сотни раз превышает предельно допустимую концентрацию (ПДК) [4, 10, 26].

Район исследования относится к Уральской геохимической провинции элювиально-трансаллювиальной области остаточных горных массивов западного склона Среднего Урала, к Верхнеяйвинскому ландшафту высоких грядово-увалистых предгорий на палеозойских карбонатных и частично терригенных породах. Климат умеренно-континентальный, среднегодовое количество осадков 700 мм. Территория КУБа относится к Западному предгорному району тяжелосуглинистых подзолистых, дерново-подзолистых и заболоченных почв. Согласно ботанико-географическому районированию, территория исследования относится к средне- и южнотаежным предгорным пихтово-еловым и елово-пихтовым лесам.

Территория отбора проб расположена в Кизеловском районе Пермского края, вблизи отвала шахты Широковская в 0,3 км от поселка Южный Коспашский (рис.1).

Объекты исследования. В 2021 г. заложены два почвенных разреза на участке сброса кислых шахтных вод на высоте 370 м над уровнем моря. Территория отбора расположена в 350 м от отвала шахты Широковская: разрез № 1 – непосредственно на участке сброса кислых шахтных вод, разрез № 2 – на рекультивированном участке сброса (рис.2). В качестве фона отобраны пробы дерново-подзолистой почвы, прикопка заложена во вторичном мелколиственном лесу в 30 м от участка бывшего сброса.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 266-278 DOI: 10.31897/PMI.2023.31
© Н.В.Митракова, Е.А.Хайрулина, С.М.Блинов, А.А.Перевощикова, 2023

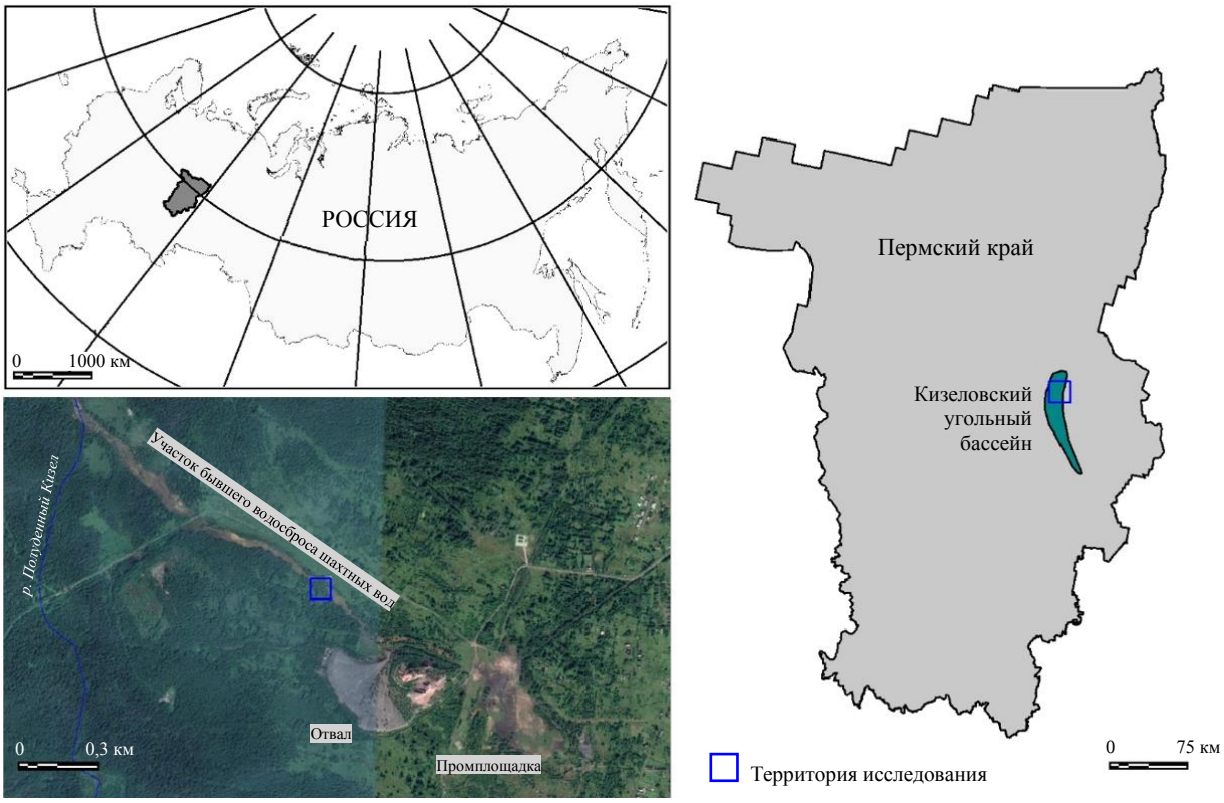


Рис.1. Географическое положение Кизеловского угольного бассейна





Местозаложения разреза № 1



Местозаложения разреза № 2

Рис.2. Территория отбора проб

Участок сброса кислых шахтных вод представляет собой полосу шириной 10-90 м, вытянутую в северо-западном направлении от территории бывшей шахты и породного отвала до р. Полуденный Кизел. Протяженность участка около 1,8 км, площадь в 2021 г., по данным ДЗЗ, составила около 20 га. Поверхность участка имеет красно-коричневую окраску и характеризуется полным отсутствием растительности. Отмечается наличие остатков погибших древесных растений.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Начало работы шахты Широковская датируется 1945 г., ликвидация – концом 1990-х годов. Ориентировочно в середине 1980-х годов проводилась нейтрализация кислых шахтных вод известью. В результате на участке сброса аккумулировалось большое количество техногенных грунтов, состоящих из тонкодисперсных гидроксидов железа со щебнем, дресвой и песком пород шахтных отвалов. Мощность техногенных грунтов в некоторых местах может достигать одного метра.

Рекультивация почвогрунта на небольшом ареале участка сброса кислых шахтных вод в районе отвала шахты Широковская проведена около 17 лет назад, она заключалась в создании искусственного щелочного геохимического барьера, способствующего снижению миграции загрязняющих веществ за счет перевода их в малоподвижные формы [27]. Для снижения кислотности грунтов в качестве реагента использовались щелочные отходы ОАО «Березниковский содовый завод» (БСЗ). Они более чем на 90 % состояли из тонкодисперсного $CaCO_3$ и не имели вредных примесей. В качестве органического вещества использовался активный ил очистных сооружений ОАО «Метафракс» (Губаха) [27]. В состав травосмеси для рекультивации входили канареечник тростниковидный *Phalaris arundinacea L.*, клевер луговой *Trifolium praténse* L., люцерна посевная *Medicago sativa* L., пырей ползучий *Elytrigia repens* (L). Проведение рекультивационных мероприятий на почвах территории кислого сульфатного стока повлекло уменьшение кислотности с 2,7-3,0 до 5,0-6,0. Рекультивация земель в угледобывающих районах часто основана на снижении кислотности и увеличении плодородия техногенных почв в целом. Рекультивация включает внесение удобрений для регулирования питательных элементов, азота, органического вещества, а также мероприятия по улучшению физических свойств почв [28]. В Европе рекультивационные мероприятия отвалов и горно-добывающих территорий проводят для возникновения устойчивых древесных насаждений, которые свидетельствуют о восстановлении экосистемы [1]. Внесение извести при рекультивации отвалов – довольно распространенный метод [28], как и внесение активного ила в качестве плодородного слоя [29].

В настоящее время на рекультивированном участке обнаружен устойчивый фитоценоз, представленный молодыми березами (род *Betula*), ивами (род *Salix*) и ольхой (род *Alnus*), а также травянистыми растениями семейств осоковые (род *Carex*), злаковыми *Poaceae*, кипрейными *Onagraceae*, гвоздичными *Caryophylláceae*, а также мхами.

Отбор проб и методы исследования. В почвенных разрезах пробы отбирались до глубины 80 см с шагом 10 см. Актуальная и обменная кислотность определялась потенциометрическим методом; определение кислотности почв в перекиси водорода проведено для окисления сульфидных минералов, присутствующих в отвалах и стоках с них (R.Brinkman и L.J.Pons[1] предложили предварительный предел pH H_2O_2 = 2,5 для опасных кислых сульфатных почв после обработки перекисью); гидролитическая кислотность определена методом Каппена (в 1М CH_3COONa вытяжке), основанном на титровании 1 н щелочью в присутствии фенолфталеина; обменную кислотность (ОК), обменный алюминий $Al_{обм}$ и обменный водород $H_{обм}$ исследовали по методу Соколова, основанному 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. Содержание органического вещества определено спектрофотометрическим методом, емкость катионного обмена (ЕКО) – по методу Бобко – Аскинази – Алешина; содержание обменного кальция и обменного (подвижного) магния исследовали комплексонометрическим титрованием; содержание подвижной серы определяли турбидиметрическим методом, подвижное железо – спектрофотометрическим методом с о-фенантролином; сульфат-ионы в водной вытяжке определены турбидиметрическим методом.

Микроэлементный состав определен методом спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на масс-спектрометре Elan 900, гранулометрический состав – при помощи набора сит «Вибротехник» и лазерного дифракционного анализатора гранулометрического состава Analysette 22 Micro Tec plus в Центре коллективного пользования уникальным оборудованием Пермского государственного национального исследовательского университета.

[1] *Brinkman R., Pons L.J.* Recognition and prediction of acid sulphate soil conditions // Proceedings of an International Symposium. 1973. P. 169-203. URL: http://www.alterra.wur.nl/Internet/webdocs/ilri-publicaties/publicaties/Pub18_vol.1/pub18v1-h6.pdf (дата обращения 04.11.2022).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 266-278 DOI: 10.31897/PMI.2023.31
© Н.В.Митракова, Е.А.Хайрулина, С.М.Блинов, А.А.Перевощикова, 2023

Для оценки уровня загрязнения почв химическими элементами был использован индекс геологического накопления элементов в почвах *Igeo*, который связывает содержание элементов природного фона почвы с влиянием деятельности человека на содержание элементов в техногенно-нарушенной почве. Индекс, широко используемый для оценки загрязнения микроэлементами поверхностных слоев почв [30, 31], был рассчитан для каждого элемента

$$Igeo = \log_2\left(\frac{Cn}{k}Bn\right),$$

где *Cn* – содержание микроэлемента в почве; *Bn* – локальное природное фоновое содержание микроэлемента в почве; *k* – коэффициент компенсации фонового содержания за счет литогенных факторов, обычно устанавливается равным 1,5 [30, 31].

Igeo делится на семь классов: $Igeo \le 0$ – практически незагрязненный; $0 < Igeo < 1$ – незагрязненный до умеренно загрязненного; $1 < Igeo < 2$ – умеренно загрязненный; $2 < Igeo < 3$ – среднезагрязненный; $3 < Igeo < 4$ – сильнозагрязненный; $4 < Igeo < 5$ – сильнозагрязненный до чрезмерно загрязненного; $5 < Igeo$ – чрезмерно загрязненный.

Экологическая оценка почвенно-растительного слоя (0-20 см) по степени суммарного загрязнения почв тяжелыми металлами проведена с использованием коэффициента загрязнения Z_c, рассчитанного согласно СанПин 1.2.3685-21.

Обсуждение результатов. *Морфология и классификация почв*. На нерекультивированном участке сброса кислых шахтных вод заложен разрез № 1. Профиль почвы состоит из несколько слоев (рис.3, *а*). Верхний слой образован техногенным материалом, накопленным в период сброса кислых шахтных вод и нейтрализации их известью, а также механического наноса песка и дресвы пород отвала. Ниже техногенного горизонта обнаружен профиль дерново-подзолистой почвы, состоящей из гумусового, элювиального, переходного и текстурно-дифференцированного горизонтов.

Техногенный слой ТСН – 0-33/33 см, коричнево-оранжевый, бесструктурный, плотный, вязкий, глинистый. Отмечается присутствие песка и дресвы вскрышных пород отвала (2-10 мм), поры отсутствуют, граница следующего слоя хорошо выражена. Объем обломочных частиц около 60 % от массы почвы.

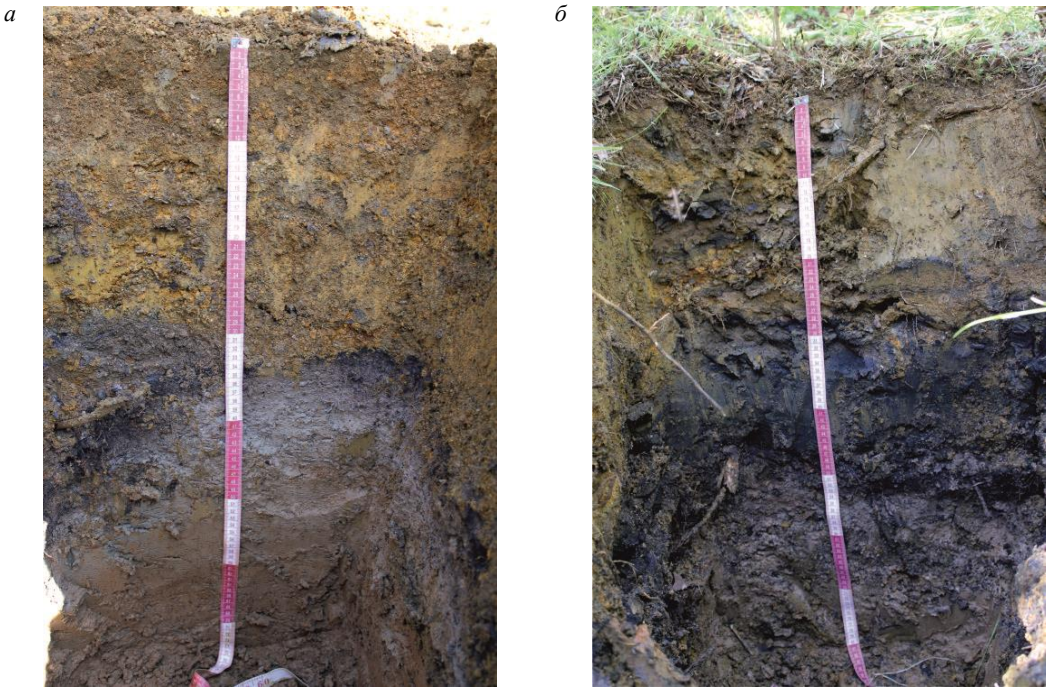


Рис.3. Почвенные разрезы: *а* – дерново-подзолистая, погребенная под техногенным слоем почва; *б* – технозем

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Гумусовый горизонт AY – 33-35/2 см, темно-серая окраска, мелкокомковатый, глинистый.

Элювиальный горизонт EL – 35-45/10 см, палевая окраска, ржавые пятна на педах почвы, глинистый, влажный, в полевых условиях бесструктурный, в сухом виде ломается в одной плоскости, что указывает на слоистость.

Субэлювиальный горизонт BEL – 45/60/15 см, светло-желто-палевая окраска, наличие железистых конкреций, глинистый, в сухом состоянии распадается на призмы, плотный, пористый.

Текстурно-дифференцированный горизонт BT – 60-80/20см, палево-коричневая окраска в сухом состоянии, красновато-коричневая в сыром, ржавые примазки, глинистый, призмовидная структура обнаружена в сухом состоянии. Согласно классификации и диагностике почв России, почва диагностирована как дерново-подзолистая глинистая почва, погребенная под техногенным слоем.

Согласно международной базе почвенных ресурсов WRB[2], почва определена как Epitechnoleptic Technosols (Supraalbic, Epithionic, Clayic, Phytotoxic, Skeletic).

На рекультивированном участке описан профиль № 2. Данная почва характеризуется наличием нескольких слоев различной окраски (рис.3, *б*). Почва глинистая, вязкая, уплотненная. На поверхности опад из листьев и травянистых остатков, ниже опада залегает техногенный горизонт буро-охристого цвета мощностью 29 см с черными прослойками и пятнами рыжего цвета. На глубине 20 см наблюдаются включения белой окраски, судя по всему, это отходы содового производства. С 29 до 52 см окраска профиля становится почти черной, наблюдается слоистость, бесструктурность. Ниже, до 80 см, залегает серо-коричневый глинистый бесструктурный слой. Почва диагностирована как технозем по дерново-подзолистой почве. Данная структура профиля сформирована в результате внесения отходов содового производства и активного ила, их перемешивания и миграции по профилю в течение последующих лет. Согласно WRB, почва диагностирована как Technosols (Clayic, Histic, Gleyic). Оба вида почв образованы в гидроморфных условиях в транс-аккумулятивном ландшафте.

Третий профиль представляет собой типичную дерново-подзолистую глинистую почву; под гумусовым горизонтом залегает элювиальный, затем переходный и ниже текстурно-дифференцированный, отмечается наличие маломощной подстилки.

Химические свойства почв. Дерново-подзолистая погребенная под техногенным слоем почва до глубины 30 см имеет резко кислую реакцию, pH H_2O = 3,0 (рис.4, *а*), с глубиной кислотность уменьшается; pH H_2O_2 до 30 см не превышает 2,5, что свидетельствует о наличии сульфидных минералов. Высокая кислотность характерна для техногенного слоя, который представлен измельченным веществом вскрышных пород отвала. Из-за присутствия пирита в минеральном составе пород происходит окисление сульфидных минералов и закисление субстрата [4, 25]. Для погребенной дерново-подзолистой почвы характерна кислая реакция, кислотность горизонтов соответствует кислотности соответствующих горизонтов фоновой почвы.

Технозем до 20 см имеет слабокислую реакцию – pH H_2O = 5,3-4,4; до глубины 50 см кислотность резко возрастает до pH H_2O = 3,3 (рис.4, *б*). Показатели актуальной кислотности коррелируют со значениями pH H_2O_2, с глубины 30-50 см в техноземе присутствуют сульфидные минералы, обеспечивающие сильно кислую реакцию почвы. Снижение кислотности в верхних слоях технозема вызвано нейтрализацией почвы в результате добавления отходов содового производства в период рекультивации.

Гидролитическая кислотность $H_{гк}$ всего профиля дерново-подзолистой, погребенной под техногенным слоем, почвы и фоновой не отличается, ее величина обусловлена наличием кислых техногенных наносов и свойствами дерново-подзолистой погребенной почвы. В техноземе величина гидролитической кислотности до 50 см ниже, чем в дерново-подзолистой погребенной и фоновой, чему способствовали проведенные рекультивационые мероприятия (табл.1).

[2] World reference base for soil resources 2014 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Rome, Italy: Food and Adriculture organization of the United Nations, 2015. 192 p.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 266-278 DOI: 10.31897/PMI.2023.31
© Н.В.Митракова, Е.А.Хайрулина, С.М.Блинов, А.А.Перевощикова, 2023

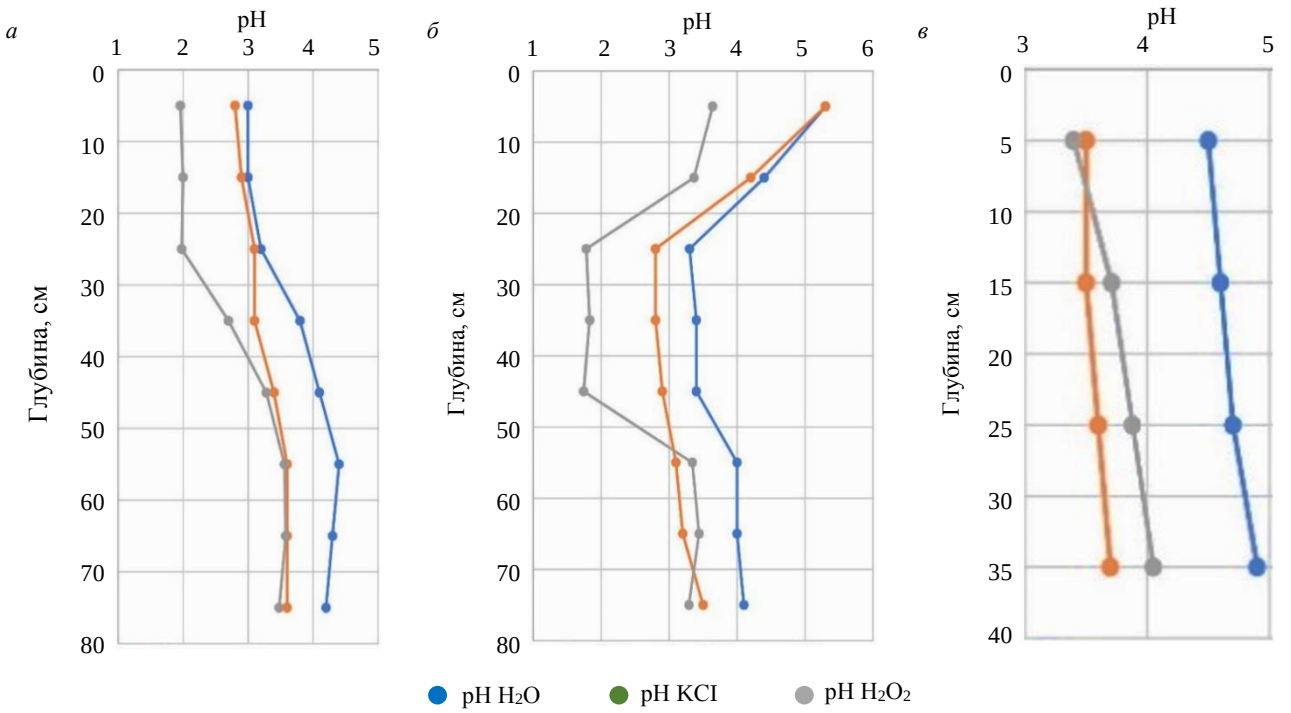


Рис.4. Кислотность почв: *а* – дерново-подзолистая, погребенная под техногенным слоем; *б* – технозем; *в* – фоновая дерново-подзолистая почва

Таблица 1

Химические свойства почв

Почва	Глубина, см	$C_{орг}$, %	$H_{гк}$, ммоль/100 г	ЕКО, ммоль/100 г	$Al_{обм}$, ммоль/100 г	ОК, ммоль/100 г	$H_{обм}$, ммоль/100 г	SO_4^{2-}, ммоль/100 г	$Ca_{обм}$, ммоль/100 г	$Fe_{подв}$, (общее), мг/кг	$Fe_{вал}$, г/кг	$S_{подв}$, мг/кг
Дерново-подзолистая, погребенная под техногенным слоем	0-10	8,2	18,9	31,0	0,62	0,75	0,13	1,7	0,50	460	200,6	724
	10-20	6,5	18,1	25,0	0,59	0,69	0,15	1,6	0,50	530	200,8	698
	20-30	8,3	16,2	24,0	0,78	0,81	0,03	1,2	0,50	620	109,8	601
	30-40	4,7	24,7	22,0	6,11	7,45	1,34	1,1	0,88	200	18,7	182
	40-50	2,35	21,1	24,0	5,56	5,60	0,04	0,6	0,50	250	11,7	129
	50-60	1,5	12,5	20,0	5,33	7,30	1,91	0,7	1,00	180	13,3	158
	60-70	1,4	14,3	20,0	6,67	6,60	0	0,6	4,25	170	13,4	148
	70-80	2,2	16,2	13,0	5,22	5,90	0,62	0,8	1,38	170	16,0	43
Технозем	0-10	19,1	4,73	31,0	0,09	0,14	0,06	7,4	7,31	380	197,8	2000
	10-20	23,0	8,40	27,0	0,01	0,04	0,03	1,9	2,25	450	190,1	869
	20-30	41,4	14,2	23,0	1,89	2,00	0,11	0,9	1,19	310	66,3	331
	30-40	65,8	11,0	21,0	2,00	2,17	0,19	0,9	1,00	200	33,1	79
	40-50	65,8	13,7	22,0	2,44	2,51	0,04	0,7	1,06	220	41,9	349
	50-60	2,51	17,9	20,0	3,33	6,20	2,90	0,9	0,88	210	14,1	142
	60-70	1,4	15,8	24,0	6,56	6,60	0,06	0,8	0,50	260	17,3	117
	70-80	1,1	18,5	21,0	4,11	4,70	0,62	1,1	0,75	170	18,6	159
Дерново-подзолистая (фон)	0-10	5,0	26,4	13,0	4,78	5,0	0,17	0,05	3,25	430	13,5	12,9
	10-20	5,1	21,4	21,0	5,78	5,9	0,12	0,05	2,25	430	13,4	4,6
	20-30	6,1	20,8	19,0	5,78	5,9	0,13	0,05	2,75	360	11,6	0,2
	30-40	2,5	19,9	17,0	5,56	6,7	1,12	1,30	2,75	260	13,1	0,9

Максимальное содержание органического вещества $C_{орг}$ характерно для 30-50 см слоя техноземa – 65,8 %, в целом в техноземе до 50 см количество органического вещества варьирует от 19,1 до 65,8 % (табл.1). Это объясняется внесением активного ила в период рекультивации и его миграции по профилю за 15-летний период. Содержание органического вещества около 8 % в техногенном слое дерново-подзолистой погребенной почвы, возможно, обусловлено присутствием угольных частиц. Емкость катионного обмена в почвах на стоке имеет средние значения и превышает емкость поглощения фоновой почвы.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Обменная кислотность и содержание $Al_{обм}$ в почвах на участке сброса кислых шахтных вод ниже, чем в фоновых почвах. Это связано с техногенным характером образования кислотности дерново-подзолистой погребенной почвы и технозема, а именно наличием сульфидных минералов. Для техногенного слоя дерново-подзолистой погребенной почвы характерна минимальная величина обменной кислотности по профилю от 0,75 до 0,81 ммоль/100 г, тогда как в горизонтах погребенной дерново-подзолистой почвы обменная кислотность соответствует фоновой почве и составляет 6-8 ммоль/100 г. Такая же тенденция характерна для $H_{обм}$.

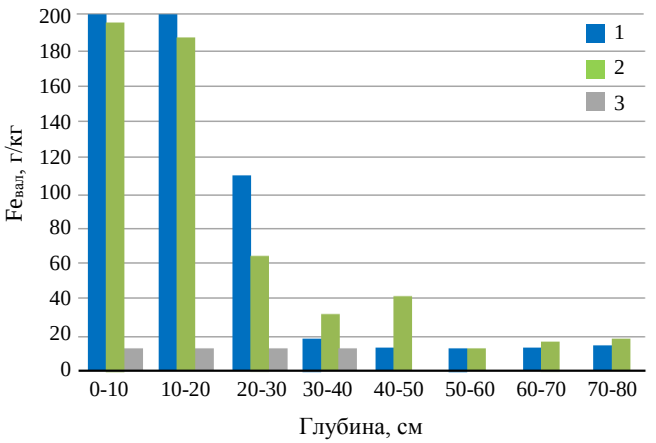


Рис.5. Содержание валового железа

1 – дерново-подзолистая, погребенная под техногенным слоем почва; 2 – технозем; 3 – дерново-подзолистая фоновая почва

Внесение ила и отходов содового производства в технозем обеспечивает низкие величины обменной кислотности от 0,09 до 2,00 ммоль/100 г до глубины 40 см. Количество обменного кальция в слое 0-10 см технозема превышает этот показатель в фоновой и погребенной почвах. В дерново-подзолистой, погребенной под техногенным слоем, почве количество обменного кальция с глубиной увеличивается, в техноземе – наоборот – уменьшается.

Содержание валового железа $Fe_{вал}$ в верхнем 20-сантиметровом слое почв на нерекультивированном и рекультивированном участках в 15 раз выше (200 г/кг), чем в гумусовом горизонте фоновой почвы (рис.5, табл.1). С глубиной в дерново-подзолистой, погребенной под техногенным слоем, почве содержание железа уменьшается до уровня фона и составляет 11-13 г/кг (рис.5).

По данным табл.1, $Fe_{вал}$ не мигрирует вниз по профилю, а остается в веществе техногенных наносов. Количество $Fe_{вал}$ в фоновой почве соответствует его содержанию в дерново-подзолистой погребенной почве с глубины 30 см, что также свидетельствует об отсутствии миграции в почве нерекультивированного участка. В техноземе отмечено его повышенное содержание до глубины 50 см, что связано с добавлением ила и отходов содового производства в верхний слой в период рекультивации, далее техногенный материал отвала и внесенные вещества были перемешаны. Это обеспечило попадание техногенного вещества в средние слои технозема и высокое содержание $Fe_{вал}$ относительно фона. Содержание подвижного железа в почвах уменьшается с глубиной, отсутствуют существенные отличия от фона.

Количество $Fe_{вал}$ в почвах на участке прежнего сброса кислых шахтных вод объясняется минералогическими особенностями вскрышных пород, основная часть минералов которых представлена неустойчивыми и хорошо растворимыми сульфатами железа [25].

В составе водной вытяжки почв преобладают сульфат-ионы, их содержание варьирует от 0,7 до 1,9 ммоль/100 г, кроме поверхностного слоя технозема – 7,4 ммоль/100 г (табл.1). Содержание подвижной серы $S_{подв}$ в исследуемых почвах не отличается и в сотни раз превышает данный показатель в фоновой почве. Выявлена корреляция содержания подвижной серы от содержания валового железа $R^2 = 0,71$. Источником подвижной серы в техногенных почвах являются техногенные наносы с породных отвалов, материал которых содержит серу в сульфидной, сульфатной и элементарной формах [32].

Исследование гранулометрического состава дерново-подзолистой погребенной почвы показало ее глинистый состав (рис.6). В слое 0-10 см дерново-подзолистой погребенной почвы значительную долю (30 %) составил гравий, около 10 % которого имеет размер от 5-10 мм и более. Это свидетельствует о наличии наносов на поверхность участка сброса кислых шахтных вод, содержащих обломки вскрышных пород. С глубиной количество гравия снижается. Преобладающей фракцией до 40 см являются частицы размером 1-0,1 мм, ниже – фракция размером 0,05-0,01 мм.

Для технозема также характерен глинистый состав, отмечается наличие в 20-сантиметровом слое гравия, однако в меньшем количестве чем в дерново-подзолистой погребенной почве, ниже 40 см гравий отсутствует.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

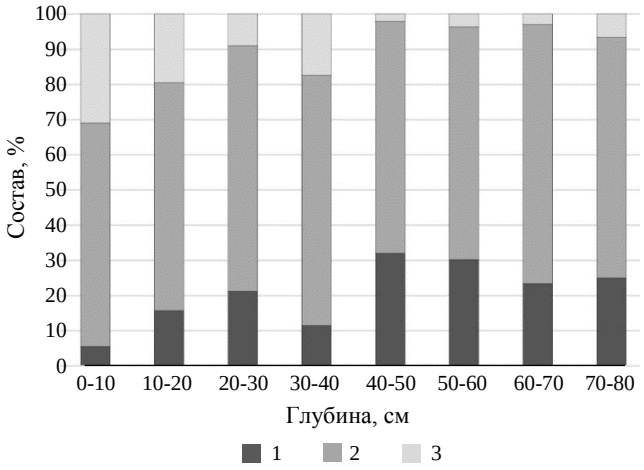


Рис.6. Гранулометрический состав дерново-подзолистой, погребенной под техногенным слоем почвы

1 – физическая глина; 2 – физический песок; 3 – гравий

Свойства погребенной дерново-подзолистой почвы соответствуют свойствам фоновой почвы. Однако 30-сантиметровый слой техногенных наносов с отвала обуславливает резко кислую реакцию почвенной среды pH H_2O = 3,0, пониженные значения обменных алюминия и кальция, повышенное содержание валового железа относительно погребенной и фоновой почв. Можно предположить, что погребенная дерново-подзолистая почва оказалась в законсервированном состоянии, ее экологические свойства не претерпели значительной трансформации. При проведении рекультивационных мероприятий техногенный слой почвы участка сброса кислых шахтных вод был перемешан с добавлением ила и карбонатсодержащих отходов, это повлекло попадание вещества наносов в более глубокие слои почвы, что вызвало еще большее варьирование свойств. В техноземе понижена актуальная (pH H_2O = 5,0) и гидролитическая кислотности, нейтрализованы сульфидные минералы в верхней части профиля, высокое содержания органического вещества и обменного кальция, повышенное содержание валового железа в большей части профиля. Проведение рекультивационных мероприятий на почвах территории кислого сульфатного стока повлекло уменьшение кислотности, увеличение количества органического углерода и емкости поглощения. Улучшение свойств почвы на рекультивированном участке обусловило возникновение устойчивого фитоценоза.

Геохимическая оценка почв. Исследование содержания микроэлементов (Cu, Zn, Co, Ni, Cd, Pb, V, Mn, Li, Be, B, Se, Al) включало выявления степени загрязнения и особенностей распределения микроэлементов по профилю почв, образованных на территории стока с угольного отвала, относительно фоновых значений, кларка по Виноградову, ОДК и индекса *Igeo.*

Содержание микроэлементов (Li, B, Fe, Co, As, Pb, Se) в исследованных почвах превышает их фоновые значения (табл.2). Это связано с высоким содержанием микроэлементов во вскрышных породах [33], а также с их высокой адсорбцией на гидроксидах железа и органическом веществе. Согласно источнику [34], тяжелые металлы сорбируются на гидроксидах железа, однако в органогенных почвах железо выступает конкурентом тяжелым металлам, гидроксиды железа могут быть использованы в качестве геохимического сорбционного барьера для аккумуляции микроэлементов.

Содержание Cu и Cd превышает ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) для кислых глинистых почв, для V обнаружено превышение ПДК. Для Zn превышение характерно для слоя 0-20 см фоновой почвы, превышения для Co и Ni обнаружено ниже геохимических барьеров в почвах на территории стока с отвала с глубиной по профилю.

Суммарный коэффициент загрязнения Z_c, рассчитанный по всем исследуемым микроэлементам для поверхностных слоев (0-10 и 10-20 см) дерново-подзолистой, погребенной под техногенным слоем, почвы и технозема указывает на отсутствие загрязнения.

Индекс *Igeo* был рассчитан для каждого элемента в корнеобитаемых слоях (0-10, 10-20 см) с использованием фонового содержания в дерново-подзолистой почве (табл.3). Исследуемые пробы дерново-подзолистой погребенной почвы характеризуются как слабозагрязненные по Li, B, V и по Se. Остальные элементы имели значения меньше нуля, что указывает на отсутствие загрязнения исследуемых почв. Так, Se формирует геохимическую специализацию почвенного покрова территории золоторудного месторождения, основными минералами которого являются пирит, халькопирит,

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

гидроксиды железа и др. [36]; источниками Li и V являются угли, при этом основными носителями Li служат иллит, монтмориллонит [37]. Из-за процессов выветривания на сульфидных рудных объектах Se, Li, V и B могут поступать в природные объекты, например в почвы, что и объясняет их наличие в техногенном наносном слое почвы на территории стока с отвала.

Таблица 2

Содержание микроэлементов в почвах стока с угольного отвала

Почва	Глубина, см	pH KCl	Cu	**Zn**	**Co**	**Ni**	**Cd**	Pb	**V**	**Mn**	**Li**	**Be**	**B**	**Se**	**Al**	Z_c*
Дерново-подзолистая, погребенная под техногенным слоем	0-10	2,8	92,87	41,90	4,35	17,47	5,17	17,94	375,58	102,25	83,11	1,75	389,27	5,16	92,52	4,3
	10-20	2,9	120,48	43,20	3,95	17,42	5,02	21,49	425,81	86,80	82,12	1,68	383,43	5,27	90,87	5,0
	20-30	3,1	111,60	67,96	9,65	33,96	8,75	25,00	314,97	192,61	70,48	2,05	330,32	3,90	175,09	–
	30-40	3,1	102,72	92,71	15,35	50,49	12,49	28,52	204,14	298,42	58,83	2,41	277,22	2,54	259,31	–
	40-50	3,4	75,57	104,02	21,22	63,83	12,37	26,53	193,77	376,28	63,00	2,53	253,15	3,53	252,18	–
	50-60	3,6	66,60	92,84	21,44	60,76	11,01	25,00	174,95	455,23	58,53	2,98	242,54	1,50	243,43	–
	60-70	3,6	68,66	92,71	21,20	59,95	11,04	27,22	181,55	454,44	53,09	2,81	240,53	1,62	229,08	–
	70-80	3,6	64,76	89,28	24,96	57,35	11,61	31,13	190,58	7,82	47,66	2,86	215,34	1,99	221,62	–
Техногенный	0-10	5,3	88,17	64,59	8,20	27,47	5,02	49,92	345,20	211,95	126,51	2,92	488,64	4,65	82,88	5,5
	10-20	4,2	85,60	61,89	7,98	26,57	4,98	47,97	330,54	204,39	121,00	2,76	468,10	4,25	84,19	5,5
	20-30	2,8	62,46	49,41	7,57	30,72	10,19	32,94	300,85	120,38	194,06	4,46	598,86	6,07	139,35	–
	30-40	2,8	71,17	53,09	9,13	37,40	10,75	30,00	303,38	112,03	249,31	5,87	711,17	4,47	146,68	–
	40-50	2,9	121,35	60,68	8,35	32,84	9,76	23,02	319,89	100,95	232,13	5,59	681,27	1,77	127,54	–
	50-60	3,1	79,61	83,93	18,44	60,68	10,49	25,40	204,55	641,08	74,77	2,64	333,30	1,33	285,55	–
	60-70	3,2	83,36	102,22	22,24	72,95	12,37	29,72	233,66	728,25	74,89	2,83	311,98	2,97	289,89	–
	70-80	3,5	72,30	106,10	25,40	75,56	9,49	28,09	242,79	573,03	71,69	3,23	283,38	1,96	262,14	–
Дерново-подзолистая (фон)	0-10	3,5	85,23	128,57	15,91	53,11	11,12	43,07	174,69	496,00	48,09	2,79	225,16	3,13	240,00	–
	10-20	3,5	79,25	126,99	15,88	53,13	11,21	33,53	176,53	511,51	44,66	2,54	221,45	3,40	226,94	–
	20-30	3,6	70,43	97,08	14,83	48,65	12,58	23,28	160,29	508,85	38,69	1,93	204,41	2,56	225,02	–
	30-40	3,7	68,08	99,73	20,29	65,23	10,74	21,95	175,05	399,31	41,80	1,95	184,34	1,79	226,71	–
Кларк по Виноградову [35]		–	47	83	18	58	0,13	16	90	1000	–	3,8	12	–	80500	–
ОДК**/ПДК		–	66/	110/	–	40/	1/	65/	/150	/1500	–	–	–	–	–	–

Примечание. Полужирным шрифтом выделены микроэлементы, для которых выявлено превышение в реках и донных отложениях КУБа по данным доклада (О состоянии и об охране окружающей среды Пермского края в 2020 году. Пермь: Министерство природных ресурсов и экологии Пермского края, 2021. 288 с.); * – Z_c рассчитан для слоев 0-10, 10-20 см (как корнеобитаемых) относительно соответствующих фоновых значений; ** – ОДК по СанПин 1.2.3685-21 (pH KCl <5,5).

Таблица 3

Результаты статистического анализа индекса геологической аккумуляции *Igeo*

Почва	**Li**	Be	**B**	Al	**V**	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	**Se**	Cd	Pb
Техногенный (среднее)	0,8	<0	0,5	<0	0,4	<0	<0	<0	<0	<0	<0	<0	<0
Дерново-подзолистая, погребенная под техногенным слоем (среднее)	0,2	<0	0,2	<0	0,6	<0	<0	<0	<0	<0	0,1	<0	<0
Уровень загрязнения	1	–	1	–	1	–	–	–	–	–	1*	–	–

* Только по дерново-подзолистой погребенной почве.

Следует отметить отсутствие интенсивной техногенной миграции элементов вниз по профилю почвы. Загрязняющие вещества, в основном Li, B, Be, Fe, V, концентрируются в поверхностных слоях почв на территории сброса кислых шахтных вод и активно мигрируют с плоскостным стоком в виде взвешенных частиц вместе с минералами отвалов в аккумулятивные ландшафты, попадают в реки, концентрируются в донных отложениях и мигрируют с водными потоками на дальние расстояния, о чем свидетельствуют данные в работах [4, 10, 38].

Заключение. На участке сброса кислых шахтных вод в результате техногенных наносов сформирована дерново-подзолистая, погребенная под техногенным слоем, почва, которая согласно WRB, определена как Epitechnoleptic Technosols (Supraalbic, Epithionic, Clayic, Phytotoxic,

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Skeletic). Профиль и свойства типичной зональной дерново-подзолистой почвы сохранены под 30-сантиметровым слоем техногенных наносов. Рекультивация данной почвы с использованием активного ила и щелочных отходов содового производства привела к возникновению технозема, по WRB почва диагностирована как Technosols (Clayic, Histic, Gleyic).

Дерново-подзолистая, погребенная под техногенным слоем, почва характеризуется резко кислой реакцией pH H_2O = 3, что является индикатором присутствия сульфидных минералов. Высокое содержание органического вещества обусловлено наличием угольных частиц (8-4,7 % в слое, образованном техногенными наносами); обменная кислотность техногенного слоя низкая; емкость поглощения средняя – 31-20 ммоль/100 г. Технозем характеризуется менее кислой реакцией pH H_2O = 4,5-5,5; содержание органического вещества до глубины 50 см варьирует от 19 до 65 %, что обусловлено рекультивационными мероприятиями. Емкость катионного обмена средняя, но количество обменного кальция в техноземе выше, чем в дерново-подзолистой погребенной почве, как и содержание $S_{подв}$. Содержание $Fe_{вал}$ в верхнем 30-сантиметровом слое почв участка сброса кислых шахтных вод варьирует от 66 до 200 г/кг, что превышает фоновые значения в 8-15 раз.

Исследование микроэлементного состава показало превышение содержания Li, B, Fe, Co, As, Pb, Se в исследованных почвах над фоновыми значениями, также обнаружено превышение ОДК для Cu, Cd и ПДК для V. Однако комплексная оценка эколого-геохимического состояния поверхностных слоев почв участка сброса кислых шахтных вод на основе коэффициентов Z_c и *Igeo* показала отсутствие загрязнения исследуемыми микроэлементами, кроме Li и B, а также Se для дерново-подзолистой, погребенной под техногенным слоем, почвы.

Рекультивация привела к улучшению физико-химических свойств техногенных почв, снижению кислотности и увеличению содержания органического вещества. Формирование устойчивого фитоценоза на рекультивированном участке сброса кислых шахтных вод свидетельствует об эффективности данного способа рекультивации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ahirwal J., Maiti S.K.* Assessment of soil properties of different land uses generated due to surface coal mining activities in tropical Sal (Shorearobusta) forest, India // CATENA. 2016. Vol. 140. P. 155-163. DOI: 10.1016/j.catena.2016.01.028

2. *Arefieva O., Nazarkina A.V., Gruschakova N.V. et al.* Impact of mine waters on chemical composition of soil in the Partizansk Coal Basin, Russia // International Soil and Water Conservation Research. 2019. Vol. 7. Iss. 1. P. 57-63. DOI: 10.1016/j.iswcr.2019.01.001

3. *Xiaoyang Liu, Huading Shi, Zhongke Bai et al.* Heavy metal concentrations of soils near the large opencast coal mine pits in China // Chemosphere. 2020. Vol. 244. № 125360. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.125360

4. *Максимович Н.Г., Пьянков С.В.* Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2018. 288 с.

5. *Chowdhury R.A., Sarkar D., Datta R.* Remediation of Acid Mine Drainage-Impacted Water // Current Pollution Reports. 2015. Vol. 1. Iss. 3. P. 131-141. DOI: 10.1007/s40726-015-0011-3

6. *Singh Kh.N., Narzary D.* Geochemical characterization of mine overburden strata for strategic overburden-spoil management in an opencast coal mine // Environmental Challenges. 2021. Vol. 3. № 100060. DOI: 10.1016/j.envc.2021.100060

7. *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. Vol. 795. № 148798. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148798

8. *Zhihong Tu, Qi Wu, Hongping He et al.* Reduction of acid mine drainage by passivation of pyrite surfaces: A review // Science of The Total Environment. 2022. Vol. 832. № 155116. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155116

9. *Kostin A.S., Krechetov P.P., Chernitsova O.V., Terskaya E.V.* Data on physico-chemical characteristics and elemental composition of gray forest soils (Greyzemic Phaeozems) in natural-technogenic landscapes of Moscow brown coal basin // Data in Brief. 2021. Vol. 35. № 106817. DOI: 10.1016/j.dib.2021.106817

10. *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. Vol. 14. Iss. 5. № 727. DOI: 10.3390/w14050727

11. *Шипилова А.М., Семина И.С.* Особенности физических свойств почв техногенных ландшафтов лесостепной зоны Кузбасса // Известия Уральского государственного горного университета. 2016. Т. 3 (43). С. 25-28. DOI: 10.21440/2307-2091-2016-3-25-28

12. *Sahoo P.K., Equeenuddin S.M., Powell M.A.* Trace Elements in Soils around Coal Mines: Current Scenario, Impact and Available Techniques for Management // Current Pollution Reports. 2016. Vol. 2. Iss. 1. P. 1-14. DOI: 10.1007/s40726-016-0025-5

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

13. *Grantcharova M.M., Fernández-Caliani J.C.* Soil Acidification, Mineral Neoformation and Heavy Metal Contamination Driven by Weathering of Sulphide Wastes in a Ramsar Wetland // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Iss. 1. № 249. DOI: 10.3390/app12010249

14. *Hulisz P., Różański S.Ł., Boman A., Rauchfleisz M.* Can acid sulfate soils from the southern Baltic zone be a source of potentially toxic elements (PTEs)? // Science of the Total Environment. 2022. Vol. 825. № 154003. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154003

15. *Ye Yuan, Zhongqiu Zhao, Shuye Niu et al.* 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. 2018. Vol. 165. P. 72-79. DOI: 10.1016/j.catena.2018.01.025

16. *Yu Feng, Jinman Wang, Zhongke Bai, Lucy Reading*. Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review // Earth-Science Reviews. 2019. Vol. 191. P. 12-25. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.02.015

17. *Bragina P.S., Tsibart 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. Vol. 47. Iss. 7. P. 723-733. DOI: 10.1134/S1064229314050032

18. *Zástěrova P., Marschalko M., Niemiec D. et al.* Analysis of Possibilities of Reclamation Waste Dumps after Coal Mining // Procedia Earth and Planetary Science. 2015. Vol. 15. P. 656-662. DOI: 10.1016/j.proeps.2015.08.077

19. *Fall L.A.C.A., Montoroi J.-P., Starh K.* Coastal acid sulfate soils in the Saloum River basin, Senegal // Soil Research. 2014. Vol. 52. Iss. 7. P. 671-684. DOI: 10.1071/SR14033

20. *Hulisz P., Kwasowski W., Pracz J., Malinowski R.* Coastal acid sulphate soils in Poland: a review // Soil Science Annual. 2017. Vol. 68. Iss. 1. P. 46-54. DOI: 10.1515/ssa-2017-0006

21. *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. Vol. 23. Iss. 4. P. 1-16. DOI: 10.12911/22998993/146269

22. *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. Vol. 40. Iss. 3. P. 606-621. DOI: 10.1007/s10230-021-00761-7

23. *Каракульева А.А., Кондратьева М.А.* Свойства эмбриоземов угольных отвалов кизеловского бассейна // Антропогенная трансформация природной среды. 2018. № 4. С. 156-159.

24. *Бердинских С.Ю., Боталов В.С., Романов А.В., Зайцев А.Г.* Агрохимическая характеристика верхнего слоя грунта на угольных терриконах и влияние глинования на их естественное заращивание (на примере Кизеловского угольного бассейна) // Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформация природной среды, 21-22 апреля 2022, Пермь, Россия. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2022. С. 437-441.

25. *Menshikova E., Osovetsky B., Blinov S., Belkin P.* Mineral Formation under the Influence of Mine Waters (The Kizel Coal Basin, Russia) // Minerals. 2020. Vol. 10. Iss. 4. № 364. DOI: 10.3390/min10040364

26. *Menshikova E., Blinov S., Belkin P. et al.* Dumps of the Kizel Coal Basin as a Potential Source of Rare and Rare-Earth Elements // Science and Global Challenges of the 21st Century – Science and Technology. Perm Forum 2021. Lecture Notes in Networks and Systems. Cham: Springer. 2022. Vol. 342. P. 352-361. DOI: 10.1007/978-3-030-89477-1_35

27. *Красильникова С.А., Блинов С.М.* Последствия сброса кислых шахтных вод в Кизеловском угольном бассейне // Естественные и технические науки. 2017. № 11 (113). С. 153-154.

28. *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. Vol. 206. № 105538. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105538

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 (21). С. 154-160.

30. *Ghrefat H.A., Abu-Rukah Y., Rosen M.A.* Application of geoaccumulation index and enrichment factor for assessing metal contamination in the sediments of Kafrain Dam, Jordan // Environmental Monitoring and Assessment. 2011. Vol. 178. Iss. 1-4. P. 95-109. DOI: 10.1007/s10661-010-1675-1

31. *Martinez L.L.G., Poleto C.* Assessment of diffuse pollution associated with metals in urban sediments using the geoaccumulation index (Igeo) // Journal of Soils and Sediments. 2014. Vol. 14. Iss. 7. P. 1251-1257. DOI: 10.1007/s11368-014-0871-y

32. *Максимович Н.Г., Мещерякова О.Ю., Березина О.А. и др.* Формирование кислых стоков с отвалов Кизеловского угольного бассейна (Пермский край) // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием. 17-20 августа 2020, Улан-Удэ, Россия. Улан-Удэ: Вестник Бурятского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук, 2020. С. 239-241. DOI: 10.31554/978-5-7925-0584-1-2020-239-241

33. *Candeias C., Ferreira da Silva E., Salgueiro A.R. et al.* The use of multivariate statistical analysis of geochemical data for assessing the spatial distribution of soil contamination by potentially toxic elements in the Aljustrel mining area (Iberian Pyrite Belt, Portugal) // Environmental Earth Sciences. 2011. Vol. 62. Iss. 7. P. 1461-1479. DOI: 10.1007/s12665-010-0631-2

34. *Yifan Lin, Jing Wang, Chunye Lin.* Vertical changes in the geochemical distributions of iron, manganese and heavy metals in wetland soil cores from cold temperate zones in northeastern China // Journal of Hazardous Materials Advances. 2022. Vol. 6. № 100085. DOI: 10.1016/j.hazadv.2022.100085

35. *Касимов Н.С., Власов Д.В.* Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестник Московского университета. 2015. Серия 5. География. № 2. С. 7-17.

36. *Мишанькин А.Ю., Язиков Е.Г., Филимоненко Е.А., Собянин Ю.П.* Минералого-геохимические особенности почвенного покрова золоторудного месторождения Вьюн (республика Саха (Якутия)) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 11. С. 98-109. DOI: 10.18799/24131830/2021/11/3381

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

37. *Beilei Sun, Yunxia Liu, Lucie Tajcmanova et al*. In-situ analysis of the lithium occurrence in the № 11 coal from the Antaibao mining district, Ningwu Coalfield, northern China // Ore Geology Reviews. 2022. Vol. 144. № 104825. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2022.104825

38. *Фетисова Н.Ф*. Исследование форм миграции металлов в реках, подверженных влиянию шахтных вод Кизеловского угольного бассейна // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 1. С. 141-152. DOI: 10.18799/24131830/2021/1/3007

***Авторы*: Н.В.Митракова,** *канд. биол. наук, старший научный сотрудник, mitrakovanatalya@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5571-7725* (*Естественнонаучный институт Пермского государственного национального исследовательского университета, Пермь, Россия*), **Е.А.Хайрулина,** *д-р географических наук, ведущий научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0002-9074-8551* (*Естественнонаучный институт Пермского государственного национального исследовательского университета, Пермь, Россия*), **С.М.Блинов,** *канд. геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0002-4953-3567* (*Естественнонаучный институт Пермского государственного национального исследовательского университета, Пермь, Россия*), **А.А.Перевощикова,** *младший научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0003-1769-7740* (*Естественнонаучный институт Пермского государственного национального исследовательского университета, Пермь, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0