

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.41+551.1/4

doi: 10.26907/2542-064X.2024.2.324-341

ДИАГНОСТИКА КИСЛЫХ СУЛЬФАТНЫХ ПОЧВ В УГЛЕДОБЫВАЮЩЕМ РАЙОНЕ В ТАЕЖНОЙ ЗОНЕ

Н.В. Митракова, Е.А. Меньшикова, Е.А. Хайрулина, Н.В. Порошина
Пермский государственный национальный исследовательский университет,
г. Пермь, 614068, Россия

Аннотация

Процессы окисления и гидролиза минералов в извлеченных на поверхность породах в горнодобывающих районах приводят к возникновению техногенных почв. Их диагностика опирается на комплекс анализов, часто трудоемких и дорогостоящих. Для сульфатных почв Кизеловского угольного бассейна (Пермский край) применен метод определения pH после разложения пероксидом водорода. Изучены почвы на участках влияния стоков с породных отвалов, самоизливов и водосбросов шахтных вод. Результаты показали наличие горизонтов, где pH после обработки H_2O_2 (pH- H_2O_2) ниже 2.5, что свидетельствует о наличии сульфидов. Кроме того, для почв характерно превышение в десятки-сотни раз содержания подвижных форм серы и железа, валовой серы, а также сульфатов относительно фона. Рентгенофазовый анализ показал наличие гётита и ярозита в исследованных почвах, что также подтверждает эффективность применения метода определения pH- H_2O_2 для экспресс-диагностики кислых сульфатных почв в горнодобывающих районах.

Ключевые слова: Кизеловский угольный бассейн, уголь, кислые сульфатные почвы, кислотность, гётит, ярозит.

Введение

Добыча угля – мощный фактор трансформации почвенного покрова [1]. Основные негативные эффекты от добычи угля связаны с загрязнением атмосферного воздуха, поверхностных вод и почв, интенсификацией эрозии и снижением биоразнообразия. Породы угольных отвалов подвергаются выветриванию, что приводит к высвобождению и активной миграции тяжелых металлов и токсичных элементов [2–4] и образованию кислых шахтных вод [5, 6]. Воздействие кислых шахтных вод на почвы в горнодобывающих районах приводит к их химической и физической трансформации [7, 8] и, как следствие, образованию кислых сульфатных почв.

Задачи диагностики и характеристики почв в районах с поступлением в окружающую среду кислых шахтных дренажей остро стоят на горнодобывающих территориях, особенно на месторождениях пирита [9], золота [10], меди, свинца [11] и угля [12, 13].

Для горнодобывающих районов России, вскрышные породы которых характеризуются высоким содержанием серы, существует проблема диагностики

техногенных почв, образованных в результате влияния кислых шахтных дренажей. Так, в Пермском крае воздействие кислых шахтных вод на почвы приурочено к территории Кизеловского угольного бассейна (КУБ). Он расположен в западной части Пермского края, его площадь составляет 1500 км². Шахты были ликвидированы в конце XX – начале XXI вв. В настоящее время наибольшее воздействие на окружающую среду (поверхностные водные объекты и почвы) оказывают кислые шахтные воды [8, 14, 15]. Их распространение связано с самоизливами из шурфов, скважин и штолен закрытых шахт, а также с образующимися стоками с породных отвалов. Кислые шахтные воды образуются в результате окисления в аэробных условиях сульфидных минералов и серы, которыми богаты угленосные породы [16, 17]. Шахтные воды имеют сильно кислую реакцию, обогащены ионами Fe, Al, Mn, Be, Li, B, V, Cu, Cr, Zn, As и Ni, при этом содержание ионов Fe, Al, Mn, Be в сотни раз превышает предельно допустимые концентрации [6, 15]. В результате воздействия кислых шахтных вод на почвы происходит их закисление и загрязнение. Почвы, в свою очередь, являются источником загрязнения поверхностных вод за счет миграции веществ от элювиальных ландшафтов, на которых расположены отвалы, к аккумулятивным.

Природные кислые сульфатные почвы распространены в прибрежных районах морей и лагун, они образуются под воздействием высокоминерализованных вод на пойменные почвы, богатые органическим материалом [18–20]. При анаэробизации в почвах происходит замещение кислорода другими элементами, в частности, сульфат, распространенный в морской воде, восстанавливается до сульфида, железо при этом восстанавливается до Fe²⁺ [21]. В результате этих процессов в почвенных горизонтах образуются сульфиды железа. Пирит является наиболее распространенным сульфидом железа в мире. В кислых сульфатных почвах также обнаружены такие вторичные минералы, как швертманнит (Fe³⁺₁₆(OH₂SO₄)₁₂₋₁₃O₁₆ · 10–12H₂O) и ярозит (KFe³⁺₃(SO₄)₂(OH)₆) [22–24]. Выветривание сульфидных и сульфатных минералов способствует снижению pH водной вытяжки из почвы (pH-H₂O) до значений 2.5–3.0, что приводит к высокой токсичности почвы.

В литературе [18, 25, 26] предложены способы диагностики кислых сульфатных почв. В настоящее время основной метод заключается в определении их кислотности после окисления сульфидных минералов (главным образом пирита (FeS₂)) пероксидом водорода [18, 26]. Однако некоторые исследования показывают, что этот метод не является окончательным для диагностики кислых сульфатных почв. Дополнительно или самостоятельно применяется метод инкубации, основанный на выдерживании почвы на воздухе в течение определенного периода времени. При этом в почве протекают реакции окисления сульфидов бактериями с образованием кислоты [18]. Инкубация проводится в два этапа до снижения pH водной вытяжки почвы ниже 4.5 [27, 28]. Сравнительно недавно разработан метод определения кислотности ультракислых почв спектрофотометрическим методом с бромкрезоловым зеленым, который апробирован на гиперсульфидных почвах южной Австралии [29]. Метод показал высокую корреляцию ($r > 0.99$) с pH-метрией в кислых средах.

Метод определения рН после обработки почв пероксидом водорода использован для исследования почв на побережьях и техногенных почв. Для почв на территории угольных, медных и золотодобывающих месторождений этот способ ранее не применялся.

1. Объекты и методы исследования

1.1. Территория и объекты исследования. Территория исследований приурочена к Уральской геохимической провинции, к области остаточных горных массивов западного склона Среднего Урала в Пермском Предуралье. Климат здесь континентальный, почвенный покров представлен в основном дерново-подзолистыми почвами. Физико-географическая характеристика Кизеловского угольного бассейна подробно приведена в работе [6].

В качестве объектов исследования рассмотрены:

- почва участка водосброса шахтных вод – дерново-подзолистая, погребенная под техногенным слоем (ДП);
- рекультивированная почва участка водосброса шахтных вод – технозем (Т);
- почвы участков стоков с угольных отвалов – серогумусовая химически-преобразованная (СГХ), серогумусовая техногенно-трансформированная (СГТ);
- почва участка самоизлива шахтных вод – серогумусовая техногенно-трансформированная оглеенная (СГ).

Сформировавшиеся техногенные почвы, или почвогрунты, образованы из природных в результате долговременного воздействия шахтных вод, т. е. основным фактором почвообразования является техногенез. В качестве фоновых отобраны серогумусовые и дерново-подзолистые почвы. Проанализировано 75 почвенных проб, из них 13 проб – фоновых. География исследования включает территории Кизеловского, Губахинского и Гремячинского районов Пермского края, изучен также почвенный покров шахт Усьва-3, Центральная, Нагорная, 40 лет Октября, Гореловская, Северная.

1.2. Методы исследования. Актуальную и потенциальную кислотность определяли потенциометрическим методом [30], гидролитическую кислотность (ГК) – методом Каппена (в 1 М CH_3COONa вытяжке), основанным на титровании 1 н щелочью в присутствии фенолфталеина [30], обменную кислотность (ОК) – по методу Соколова, основанному на обработке почвы раствором 1 М KCl с последующим титрованием щелочью для обнаружения суммы обменных алюминия и водорода [31]. Обменный алюминий определяли спектрофотометрически в виде комплекса с ксиленоловым оранжевым согласно методике [32]. Содержание подвижного железа устанавливали спектрофотометрически по реакции с *o*-фенантролином [33]. Сульфат-ионы определяли в водной вытяжке почвы [34], а подвижную серу – после извлечения сульфат-ионов 1 М раствором KCl (в солевой вытяжке) [35]. Для определения валовой серы проводили кислотное разложение навески почвы смесью хлорной и азотной кислот согласно [36]. Для установления содержания сульфат-ионов в вышеперечисленных вытяжках использовали турбидиметрический метод с хлоридом бария в присутствии стабилизатора – глицерина [36].

Рентгенофазовый анализ образцов проводили на рентгеновском порошковом дифрактометре D2 Phaser (“Bruker”, Германия) с излучением CuK_α ($\lambda = 1.54060 \text{ \AA}$), генератором с напряжением 30 кВ и силой тока 10 мА и линейным детектором

LYNXEYE. Порошковую пробу помещали в кювету и регистрировали дифрактограмму при следующих условиях: расходящаяся щель 0.6 мм, первичная и вторичная щели Соллера 2.5°, диапазон углов 2θ от 5 до 70°, экспозиция 1.0 с в точке, шаг сканирования 0.03°. Обработка кривых (сглаживание, поиск пиков) и качественный анализ выполняли с помощью программного пакета Diffrac.Eva. Для поиска минеральных фаз использовали базу данных порошковой дифрактометрии PDF-2.

Количественный анализ валового состава пробы выполняли с помощью программного обеспечения Toras 4.2, которое реализует безэталонный анализ на основе метода Ритвельда – процедуры минимизации отклонения между экспериментальной и теоретически рассчитанной дифрактограммами. Сумму минеральных фаз рассчитывали по отношению к 100%.

Определение кислотности почв после обработки пероксидом водорода проводили для оценки окисления сульфидных минералов, присутствующих в отвалах и стоках с них. Согласно работе [37], предварительный предел $pH-H_2O_2$ для опасных кислых сульфатных почв после обработки пероксидом водорода составляет 2.5. Для потенциометрического определения pH после обработки почвы 30%-ным пероксидом водорода использовали иономер рХ-150 МИ (НПО «Измерительная техника», Россия) в сочетании с комбинированным стеклянным электродом ЭСК-10603/7 (НПО «Измерительная техника», Россия).

Для статистического анализа использовали программное обеспечение STATISTICA 7 (Statsoft, США), MS Exel (Microsoft, США) и Past 4.03. Для статистической обработки полученных данных использовали регрессионный и корреляционный анализ при доверительной вероятности 95%. Образцы почв сравнивали дисперсионным непараметрическим методом (критерий Краскела – Уоллиса). Значимые различия между сравниваемыми средними значениями рассчитывали на уровне достоверности 95% и выше ($p < 0.05$).

2. Результаты и обсуждение

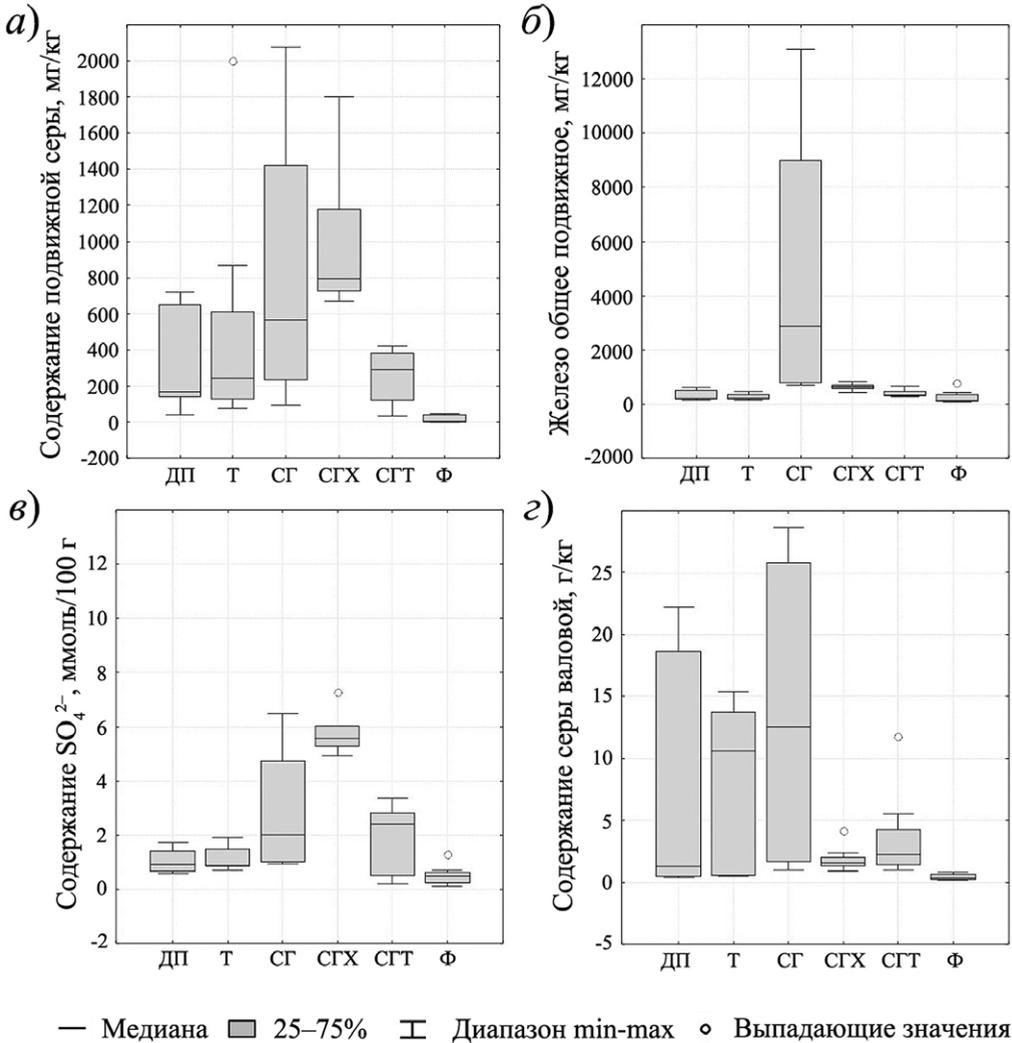
За трехлетний период исследования почв КУБ нами были диагностированы как антропогенно-сконструированные, так и химически-преобразованные почвы. Основным фактором формирования техногенных почв являются процессы гипергенеза сульфидных минералов шахт и отвалов.

Кислые сульфатные почвы на территории КУБ образовались под воздействием кислых шахтных вод на участках влияния водосброса, стоков отвалов и самоизливов. Часто у этих почв наблюдается наличие техногенного слоя, образованного в результате наносов.

На участке водосброса шахты Широковская исследованы две почвы: ДП и Т. ДП почва характеризуется наличием техногенных наносов мощностью около 40 см. Горизонт, состоящий из техногенных наносов, отличается низким pH ($pH-H_2O = 3.0$), максимальным содержанием органического углерода (8.2%), сульфатов (800 мг/кг), подвижных железа (620 мг/кг) и серы (730 мг/кг) [8], а также валовой серы (22 г/кг) (рис. 1, з). Ниже техногенного слоя сохранен профиль дерново-подзолистой почвы со слабокислой реакцией среды $pH-H_2O = 4.1-4.4$, низким содержанием сульфатов (30–40 мг/кг), подвижной серы (158 мг/кг) и валовой серы (0.4–0.6 г/кг) (рис. 1 и 2). При этом количество обменного алюминия в погребенной дерново-подзолистой почве в 20–30 раз

превышает этот показатель в слое техногенных наносов. Растительность полностью отсутствует.

Рис. 1. Химические показатели почв: *a* – содержание подвижной серы; *б* – железо общее



подвижное; *в* – содержание SO_4^{2-} ; *г* – содержание серы валовой. Почвы: ДП – дерново-подзолистая, погребенная под техногенным слоем; Т – технозем; СГ – серогумусовая техногенно-трансформированная на излив; СГХ – серогумусовая химически-преобразованная; СГТ – серогумусовая техногенно-трансформированная на стоке с отвала; Ф – фоновые

Данная тенденция также наблюдается в почвах Подмосквовного бурогоугольного бассейна [38], почвы которого характеризуются кислой реакцией, высоким содержанием обменного алюминия и подвижного железа(III) и наличием техногенных наносов, составляющих техногенный горизонт разного состава.

Т образован на участке водосброса после проведения рекультивационных мероприятий в начале 2000-х гг. Рекультивация проведена с использованием отходов содового производства и активного ила [8]. Т имеет кислую среду

($pH-H_2O = 3.3-5.3$), характеризуется высоким содержанием органического углерода в срединной части профиля (около 65%), количество валовой серы снижается с 15 г/кг на поверхности до 10 г/кг на глубине 50 см, наибольшее количество сульфатов (7.4 смоль/кг) обнаружено в верхнем слое, содержание подвижной серы и железа уменьшается с глубиной. В связи с уменьшением кислотности и увеличением количества органического углерода в верхних слоях Т на данной почве произошло развитие растительности, которая представлена в основном растениями семейства осоковых *Carex* sp. и злаками *Poaceae* sp., а из древесных растений на участке обнаружена только береза *Betula* spp.

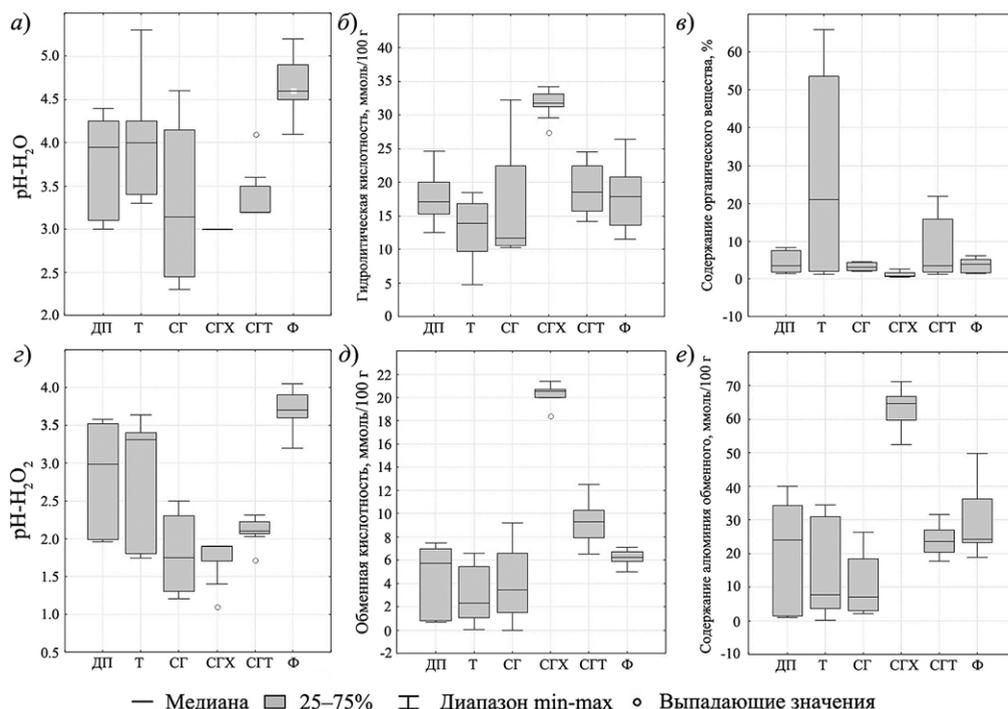


Рис. 2. Кислотность почв: а – $pH-H_2O$; б – гидролитическая кислотность; в – содержание органического вещества; г – $pH-H_2O_2$; д – обменная кислотность; е – содержание алюминия обменного. Обозначения почв аналогичны представленным на рис. 1

СГ почва диагностирована на участке самоизлива кислых шахтных вод. В результате поступления кислых вод со взвесьями из шурфа и процессов окисления на поверхности фоновой серогумусовой почвы образовался слой техногенных наносов, представленный в основном гидроксидами железа. Излишняя обводненность также привела к оглеению почвы. Содержание органического углерода увеличивается с глубиной, наибольшие значения наблюдаются на глубине 30–40 см (4.5%). По сравнению с фоновыми показателями данная почва более кислая ($pH-H_2O = 2.3-4.6$), содержание подвижного Fe(II) в нижнем слое составляет 4.5 г/кг, а в верхнем слое оно очень высокое (13 г/кг). Такая же тенденция наблюдается для сульфатов (6.5 смоль/кг), подвижной серы (2080 мг/кг) и валовой серы (13 г/кг) (рис. 1), с увеличением глубины значения данных показателей снижаются. Растительность представлена единичными видами *Betula* spp.

У подножия породных отвалов также обнаружены кислые почвы. Такие почвы испытывают меньшее воздействие агрессивных вод, что связано с периодичностью осадков и возрастанием количества рекультивированных отвалов. На территориях стока с отвала образуются химически-преобразованные почвы и техногенно-трансформированные, т. е. помимо изменения химических свойств почв происходят их морфологические трансформации. Химически-преобразованные почвы образуются при отсутствии наносов. СГХ почва (сток с отвала шахты Гореловская) является сильнокислой ($\text{pH-H}_2\text{O} = 2.8\text{--}3.1$) (рис. 2), характеризуется высоким содержанием сульфатов, подвижной и валовой серы (рис. 1). При этом максимальные значения свойственны для верхнего слоя (12.7 смоль/кг, 1480–1800 мг/кг и 4.1 г/кг для сульфатов, подвижной и валовой серы соответственно). Подвижное железо представлено в основном Fe(III), количество которого снижается с ростом глубины от 2794 мг/кг. Количество обменного алюминия соответствует уровню фона (50–70 ммоль/100 г) и превышает его содержание в остальных почвах, образованных при воздействии кислых шахтных вод. Гранулометрический анализ почвы показал увеличение доли частиц размером 0.05–0.01 мм и снижение доли частиц размером 0.01– < 0.002 мм относительно фоновой почвы. Растительность представлена единичными видами *Betula* spp.

СГТ почва, диагностированная на стоке с шахты Усьва, характеризуется изменением химических свойств и морфологической структуры в результате поступления на этот участок глинистых наносов с отвала. Отвал расположен на возвышенности, высота над уровнем моря составляет 275 м. Наносы образовались в результате смыва вещества отвала и глины, которой был экранирован отвал при рекультивации. После рекультивации отвал сохранил крутые склоны, поэтому глина стекает во время сильных дождей и снеготаяния к подножию отвала и далее вниз по склону. В результате наносов на поверхности почвы образовался слой мощностью 34 см, который представлен слоем 0–6 см, состоящим из чередующихся слоев глины и подстилки из листьев березы, и слоем 6–34 см, представляющим собой измельченный материал отвала с включениями угля. СГТ почва характеризуется кислой реакцией ($\text{pH-H}_2\text{O} = 4.1$ в верхнем слое и уменьшается с ростом глубины до 3.2). Содержание сульфат-ионов и подвижной серы увеличивается с глубиной, при этом максимальное содержание валовой серы отмечено на глубине 21–4 см и составило 11.7 г/кг. Содержание органического углерода максимально в слоях 6–24 и 24–31 см и равно 19.7% и 21.9% соответственно, с глубины 41 см содержание органического углерода составляет около 2%. Судя по всему, высокое содержание органического углерода в верхних слоях связано с наличием включений угля. Гидролитическая кислотность незначительно уменьшается по профилю с 24.5 до 14.2 ммоль/100 г. Обменная кислотность и содержание обменного алюминия по профилю изменяются незначительно. Растительность также представлена единичными видами *Betula* spp.

Таким образом, исследованные почвы территории КУБ характеризуются кислой реакцией (рис. 2 а, б, г, д), причем техногенные наносы имеют более низкие значения $\text{pH-H}_2\text{O}$, чем погребенная под ними почва. Анализ Краскела – Уоллиса показал, что гидролитическая кислотность Т достоверно ниже, чем

для ДП почвы и серогумусовых почв, образованных на участке влияния стока с отвала (рис. 2, б). Серогумусовые почвы (СГ, СГХ, СГТ) имеют более кислую реакцию, чем Т. Наибольшая величина обменной кислотности характерна для СГХ почвы (рис. 2, д). Анализ рН почв после обработки пероксидом водорода показал, что во всех исследованных почвах присутствуют горизонты с $\text{pH-H}_2\text{O}_2$ менее 2.5 (рис. 2, з), что является признаком наличия сульфидов.

Следует отметить, что значения соответствующих показателей в фоновых почвах были в несколько десятков-сотен раз меньше по сравнению с техногенными почвами.

Минимальные значения $\text{pH-H}_2\text{O}_2$ в Т характерны для глубины 20–50 см (рис. 3), в ДП почве – для слоя техногенных наносов. Серогумусовые трансформированные и химически-преобразованные почвы имеют низкие показатели $\text{pH-H}_2\text{O}_2$ по всему профилю (рис. 3).

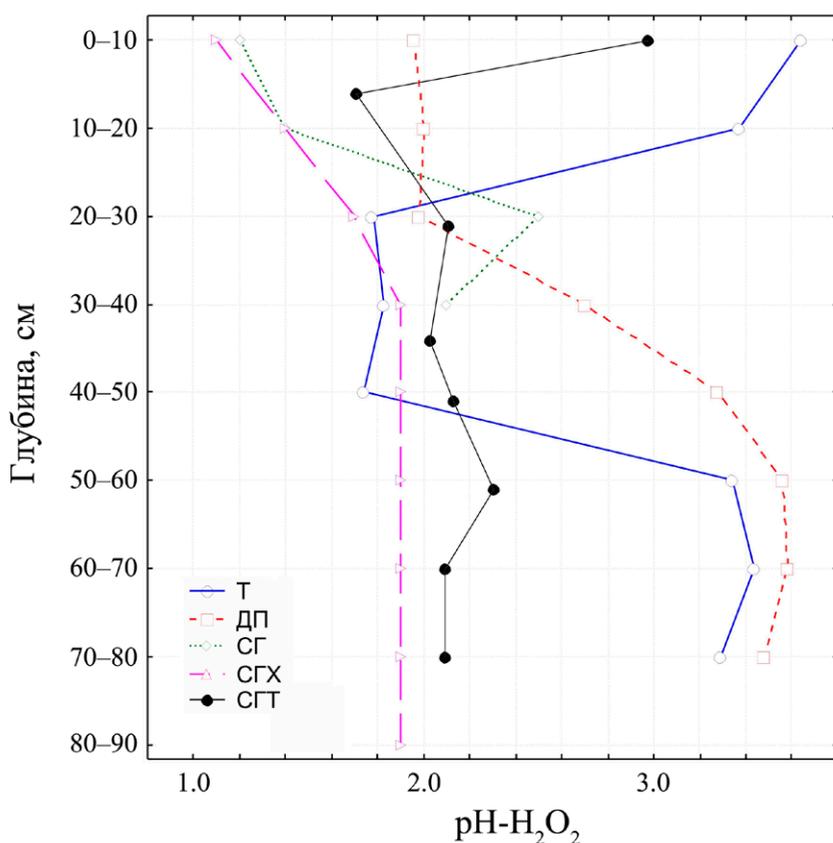


Рис. 3. Распределение $\text{pH-H}_2\text{O}_2$ по профилям техногенных почв

Следует отметить, что в пробе фоновой серогумусовой грубогумусированной почвы, верхний слой которой представлен горизонтом со слабо разложившимся органическим веществом, $\text{pH-H}_2\text{O}_2$ составил 1.9. Такое значение связано с тем, что органическое вещество пробы сильно окислилось при взаимодействии с пероксидом водорода, что также отмечено в работе [26]. Однако подобные образцы, кроме описанного выше, отсутствовали. $\text{pH-H}_2\text{O}_2$ в фоновых пробах варьируется в диапазоне 3.2-4.05.

Для Т и СГТ почвы типично наличие пятен желтой окраски в слое, характеризующемся минимальным значением $\text{pH-H}_2\text{O}_2$ и максимальным содержанием органического вещества. Судя по всему, эти пятна указывают на наличие вторичного ярозита, который выпадает из сульфатных вод за счет контакта с кислородом воздуха. Так, образование ярозита в кислых сульфатных почвах при выветривании сульфидов описано в техногенных почвах в заброшенных угольных шахтах в Польше [39]. При этом наличие ярозита способствует сохранению сильной кислотности почв [20].

Наибольшее содержание подвижной серы, как и сульфатов, характерно для СГХ почвы (рис. 1, *а* и *в*). Для подвижного железа данная тенденция наблюдается для СГ почвы (рис. 1, *б*), в которой высокое содержание подвижного железа обусловлено постоянным поступлением кислых сульфатных вод на поверхность почвы и последующим образованием глеевой обстановки на глубине. Содержание валовой серы в техногенных почвах значительно превышает фоновый уровень (рис. 3, *з*), при этом значимых отличий по содержанию валовой серы в техногенных почвах не выявлено.

Статистическая обработка (корреляция Пирсона) показала, что между кислотностью и содержанием подвижной серы и сульфатов существует сильная отрицательная корреляция (табл. 1), а корреляция с валовой серой несколько меньше (табл. 1). Обменная и гидролитическая кислотность также коррелируют с содержанием подвижной серы и сульфатов, т. е. количество серы и сульфатов в почвах обосновывают ее кислотность. Обнаружена положительная корреляция между содержаниями подвижных железа и серы, при этом наибольший вклад оказывает Fe(III) (табл. 1). Между содержанием валовой серы и подвижного железа также установлена положительная корреляция. Содержание органического углерода положительно коррелирует лишь с уровнем сульфатов и валовой серы. При этом наблюдается его отрицательная корреляция с pH после обработки почвы пероксидом водорода (табл. 1). Корреляция содержания органического углерода с соединениями серы объясняется тем, что количество углерода связано с углями, которые обогащены сернистыми соединениями.

Для проверки достоверности применения метода $\text{pH-H}_2\text{O}_2$ для диагностики кислых сульфатных почв проведен рентгенофазовый анализ Т и ДП почв (рис. 4). Установлено, что обе почвы содержат гётит ($\text{FeO}(\text{OH})$), что обусловлено техногенными наносами, сформированными за счет осаждения Fe(III) из кислых вод, и непосредственным окислением сульфидов железа. При этом его доля в техногенном горизонте ДП почвы составляет более 90%. В Т обнаружен ярозит. Судя по всему, к его образованию причастны кислые сульфатные воды и добавление активного ила при рекультивации. Как известно, ярозит образуется в кислых сульфатных почвах при высоком содержании сульфатов и органического вещества. Этот минерал играет ключевую роль в сохранении химически агрессивных условий в сульфатно-кислых почвах [24]. Гётит, как и ярозит, способен образовываться за счет окисления сульфидных минералов, если они присутствуют в отходах. Сходный процесс обнаружен на хвостохранилищах Дальнего Востока [40].

Табл. 1

Корреляция химических показателей почв (указаны достоверные корреляционные связи)

Показатель	pH-H ₂ O	pH-KCl	pH-H ₂ O ₂	SO ₄ ²⁻	Fe _{подв}	S _{подв}	Al _{обменный}	Гидролитическая кислотность	Обменная кислотность	Fe (II)	Fe (III)	S _{растворимая}	C _{орг}
pH-H ₂ O	1.00	0.98	0.93	-0.68	-0.30	-0.73	-0.36	-0.59	-0.44	-	-0.36	-0.53	-
pH-KCl	0.98	1.00	0.92	-0.67	-	-0.73	-0.32	-0.57	-0.41	-	-0.36	-0.57	-
pH-H ₂ O ₂	0.93	0.92	1.00	-0.71	-0.37	-0.76	-0.37	-0.61	-0.44	-	-0.36	-0.52	-0.33
SO ₄ ²⁻	-0.68	-0.67	-0.71	1.00	-	0.89	0.49	0.74	0.55	-	0.30	0.41	0.38
Fe _{подв}	-0.30	-	0.37	-	1.00	0.49	-	-	-	0.31	0.95	0.59	-
S _{подв}	-0.73	-0.73	-0.76	0.89	0.49	1.00	0.36	0.68	0.40	-	0.53	0.55	-
Гидролитическая кислотность	-0.59	-0.57	-0.61	0.74	-	0.68	0.77	1.00	0.79	-	-	-	-
Обменная кислотность	-0.44	-0.41	-0.44	0.55	-	0.40	0.96	0.79	1.00	-	-	-	-
Fe(II)	-	-	-	-	0.31	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe(III)	-0.36	-0.36	-0.36	0.30	0.95	0.53	-	0.35	-	-	-	0.64	-
Al _{обменный}	-0.36	-0.32	-0.37	0.49	-	0.36	1.00	0.77	0.96	-	-	-	-
S _{растворимая}	-0.53	-0.57	-0.52	0.41	0.59	0.55	-	-	-	-	0.64	1.00	0.41
C _{орг}	-	-	0.33	0.38	-	-	-	-	-	-	-	0.41	-

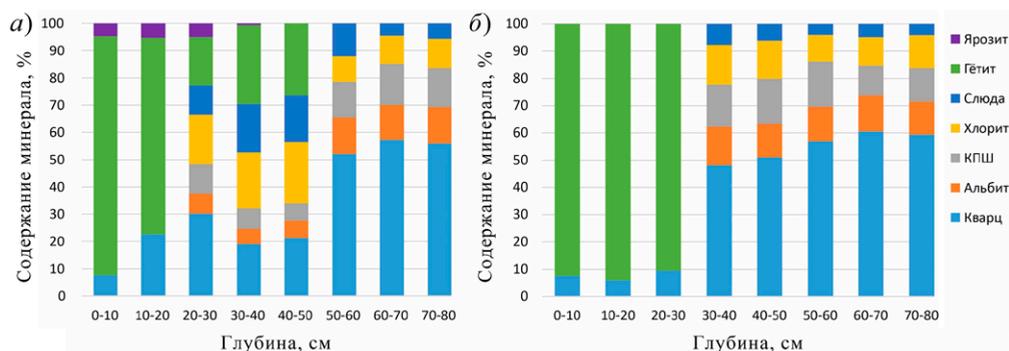


Рис. 4. Результаты рентгенофазового анализа технозема (а) и дерново-подзолистой погребенной под техногенным слоем почвы (б). КПШ – калиевый полевоый шпат

Заклучение

Исследования территории КУБ показали, что на участках влияния стоков с породных отвалов, самоизливов и водосброса шахтных вод образуются кислые сульфатные почвы. Образование техногенных сульфатных почв происходит в результате воздействия на природные почвы кислых шахтных вод, при этом отмечаются коренные изменения физических и химических свойств исходных почв.

При воздействии кислых шахтных вод на почвы происходит увеличение их кислотности ($\text{pH-H}_2\text{O}$ – 2.3–3.0), содержания валовой серы, сульфатов, подвижных серы и железа в десятки и сотни раз относительно фоновых значений. Для техногенных почв характерно изменение гранулометрического состава, потеря ила, возрастание содержания крупных фракций. Почвы претерпевают морфологические изменения в связи с возникновением техногенных слоев или изменением водного режима.

Эффективным способом диагностики кислых сульфатных почв на территориях, связанных с горнодобывающей деятельностью, является определение pH после обработки почв пероксидом водорода. Данный метод является наиболее доступным и быстрым способом идентификации кислых сульфатных почв и может использоваться для целей экологического мониторинга территорий, подверженных влиянию горнодобывающей промышленности.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект FSNF-2020-0021), а также Пермского научно-образовательного центра мирового уровня «Рациональное недропользование», 2023 г.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. Rouhani A., Gusiatin M.Z., Hejzman M. An overview of the impacts of coal mining and processing on soil: Assessment, monitoring, and challenges in the Czech Republic // *Environ. Geochem. Health*. 2023. V. 45, No 11. P. 7459–7490. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01700-x>.
2. Abliz A., Shi Q., Keyimu M., Sawut R. Spatial distribution, source, and risk assessment of soil toxic metals in the coal-mining region of northwestern China // *Arabian J. Geosci.* 2018. V. 11, No 24. Art. 793. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4152-8>.

3. *Ribeiro J., Flores D.* Occurrence, leaching, and mobility of major and trace elements in a coal mining waste dump: The case of Douro Coalfield, Portugal // *Energy Geosci.* 2021. V. 2, No 2. P. 121–128. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2020.09.005>.
4. *Thomas G., Sheridan C., Holm P.E.* Arsenic contamination and rare earth element composition of acid mine drainage impacted soils from South Africa // *Miner. Eng.* 2023. V. 203. Art. 108288. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108288>.
5. *Nordstrom K.D., Blowes D.W., Ptacek C.J.* Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: An update // *Appl. Geochem.* 2015. V. 57. P. 3–16. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.02.008>.
6. *Максимович Н.Г., Пьянков С.В.* Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2018. 288 с.
7. *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 Brief.* 2021. V. 35. Art. 106817. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.106817>.
8. *Mitrakova N.V., Khayrulina E.A., Blinov S.M., Perevoshchikova A.A.* Efficiency of acid sulphate soils reclamation in coal mining areas // *J. Min. Inst.* 2023. V. 260, No 2. P. 266–278. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.31>.
9. *Alvarenga P., Mourinha C., Palma P., Cruz N., Rodrigues S.M.* Assessment of soil physicochemical characteristics and As, Cu, Pb and Zn contamination in non-active mines at the Portuguese sector of the Iberian Pyrite Belt // *Environments.* 2022. V. 9, No 8. Art. 105. <https://doi.org/10.3390/environments9080105>.
10. *Mimba M.E., Mbafor P.U.T., Fils S.C.N., Nforba M.T.* Environmental impact of artisanal and small-scale gold mining in East Cameroon, Sub-Saharan Africa: An overview // *Ore Energy Resour. Geol.* 2023. V. 15. Art. 100031. <https://doi.org/10.1016/j.oreoa.2023.100031>.
11. *Fernández-Caliani J.C., Barba-Brioso C., González I., Galán E.* Heavy metal pollution in soils around the abandoned mine sites of the Iberian Pyrite Belt (Southwest Spain) // *Water, Air, Soil Pollut.* 2009. V. 200, No 1–4. P. 211–226. <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9905-7>.
12. *Солнцева Н.П., Рубилина Н.Е., Герасимова М.И., Алистратов С.В.* Изменение морфологии выщелоченных черноземов в районах добычи угля // *Почвоведение.* 1992. № 1. С. 17–29.
13. *Kostin A., Krechetov P., Chernitsova O.* Alteration of physico chemical and morphological characteristics of sod-podzolic soils in technogenically-affected landscapes of Moscow Brown Coal Basin // *Mine water: Technological and Ecological Challenges: Proc. IMWA 2019 Conf. (Perm, July 15–19, 2019).* Perm: Perm State University, 2019. P. 725–731.
14. *Menshikova E., Osovetsky B., Blinov S., Belkin P.* Mineral formation under the influence of mine waters (The Kizel Coal Basin, Russia) // *Minerals.* 2020. V. 10, No 4. Art. 364. <https://doi.org/10.3390/min10040364>.
15. *Ushakova E., Menshikova E., Blinov S., Osovetsky B., Belkin P.* Environmental assessment impact of acid mine drainage from Kizel Coal Basin on the Kosva Bay of the Kama Reservoir (Perm Krai, Russia) // *Water.* 2022. V. 14, No 5. Art. 727. <https://doi.org/10.3390/w14050727>.
16. *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.

17. *Barthen R., Sulonen M.L.K., Peräniemi S., Jain R., Lakaniemi A.-M.* Removal and recovery of metal ions from acidic multi-metal mine water using waste digested activated sludge as biosorbent // *Hydrometallurgy*. 2022. V. 207. Art. 105770. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105770>.
18. *Fitzpatrick R., Shand P.* (Eds.) *Inland acid sulfate soil systems across Australia*. CRC LEME Open File Report 249. Perth: CRC LEME, 2008. 303 p.
19. *Nyman A., Johnson A., Yu C., Sohlenius G., Becher M., Dopson M., Åström M.* A nationwide acid sulfate soil study – a rapid and cost-efficient approach for characterizing large-scale features // *Sci. Total Environ.* 2023. V. 869. Art. 161845. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161845>.
20. *Salo H., Virtanen S., Laine-Kaulio H., Koivusalo H., Jacques D., Kokkonen T.* Evolution of pH, redox potential and solute concentrations in soil and drainage water at a cultivated acid sulfate soil profile // *Geoderma*. 2023. V. 436. Art. 116559. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116559>.
21. *Boman A., Åström M., Fröjdö S.* Sulfur dynamics in boreal acid sulfate soils rich in metastable iron sulfide – the role of artificial drainage // *Chem. Geol.* 2008. V. 255, No 1–2. P. 68–77. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.06.006>.
22. *Bigham J.M., Schwertmann U., Traina S.J., Winland R.L., Wolf M.* Schwertmannite and the chemical modeling of iron in acid sulfate waters // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1996. V. 60, No 12. P. 2111–2121. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(96\)00091-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(96)00091-9).
23. *Vithana C.L., Sullivan L.A., Burton E.D., Bush R.T.* Stability of schwertmannite and jarosite in an acidic landscape: Prolonged field incubation // *Geoderma*. 2015. V. 239–240. P. 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.09.022>.
24. *Trueman A.M., McLaughlin M.J., Mosley L.M., Fitzpatrick R.W.* Composition and dissolution kinetics of jarosite-rich segregations extracted from an acid sulfate soil with sulfuric material // *Chem. Geol.* 2020. V. 543. Art. 119606. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119606>.
25. *Lin C., Melville M.D.* Acid sulphate soil-landscape relationships in the Pearl River Delta, southern China // *Catena*. 1994. V. 22, No 2. P. 105–120. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(94\)90020-5](https://doi.org/10.1016/0341-8162(94)90020-5).
26. *Sullivan L., Ward N., Toppler N., Lancaster G.* *National Acid Sulfate Soils Guidance: National Acid Sulfate Soils Sampling and Identification Methods Manual*. Water Quality Australia. Canberra: Dep. Agric. Water Resour., 2018. 62 p.
27. *Creeper N., Fitzpatrick R., Shand P., Self P., Kingham R.* A systematic analysis procedure incorporating the chip-tray incubation method for the hazard assessment of Acid Sulfate Soils in the Murray-Darling Basin // *Proc. 19th World Congr. of Soil Science; Soil Solutions for a Changing World (Brisbane, August 1–6, 2010)*. Brisbane: Int. Union of Soil Sci., 2010. P. 75–78.
28. *Hulisz P., Rożański S.L., Boman A., Rauchfleisz M.* Can acid sulfate soils from the southern Baltic zone be a source of potentially toxic elements (PTEs)? // *Sci. Total Environ.* 2022. V. 825. Art. 154003. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154003>.
29. *Bargrizan S., Smernik R.J., Fitzpatrick R.W., Mosley L.M.* The application of a spectrophotometric method to determine pH in acidic (pH < 5) soils // *Talanta*. 2018. V. 186. P. 421–426. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.04.074>.
30. *Воробьева Л.А.* Теория и практика химического анализа почв. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
31. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. 2-е изд. М.: Изд-во Московского университета, 1970. 488 с.
32. ГОСТ 26485-85. Почвы. Определение обменного (подвижного) алюминия по методу ЦИНАО. М.: Издательство стандартов, 1985. 5 с.

33. ГОСТ 27395-87. Почвы. Метод определения подвижных соединений двух- и трехвалентного железа по Веригиной-Аринушкиной. М.: Издательство стандартов, 1987. 11 с.
34. ГОСТ 26426-85. Почвы. Методы определения иона сульфата в водной вытяжке. М.: Издательство стандартов, 1985. 7 с.
35. ГОСТ 26490-85. Почвы. Определение подвижной серы по методу ЦИНАО. М.: Издательство стандартов, 1985. 4 с.
36. ПНД Ф 16.1:2.2:3.37-2002. Количественный химический анализ почв. Методика измерений валового содержания серы в почвах, грунтах, донных отложениях и отходах турбидиметрическим методом. М., 2002. 18 с.
37. *Brinkman R., Pons L.J.* Recognition and prediction of acid sulphate soil conditions // *Acid Sulphate Soils: Proc. Int. Symp. on Acid Sulphate Soils / Dost H. (Ed.). Publ. 18. Wageningen: Int. Inst. Land Reclam. Improv., 1973. V. 1. P. 169–203.*
38. *Костин А.С., Кречетов П.П.* Трансформация почв в зоне влияния отвалов подмосковного бурогоугольного бассейна // *Почвы и земельные ресурсы: современное состояние, проблемы рационального использования, геоинформационное картографирование: материалы международной научно-практической конференции. Минск: Белорусский государственный университет, 2018. С. 213–219.*
39. *Uzarowicz Ł., Skiba S.* Technogenic soils developed on mine spoils containing iron sulphides: Mineral transformations as an indicator of pedogenesis // *Geoderma. 2011. V. 163, No 1–2. P. 95–108. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.04.008>.*
40. *Зверева В.П., Фролов К.Р., Лысенко А.И.* Химические реакции и условия минералобразования на хвостохранилищах Дальнего Востока России // *Горные науки и технологии. 2021. Т. 6, № 3. С. 181–191. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-3-181-191>.*

Поступила в редакцию 25.09.2023

Принята к публикации 27.12.2023

Митракова Наталья Васильевна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии техногенных ландшафтов Естественнонаучного института

Пермский государственный национальный исследовательский университет
ул. Букирева, д. 15, г. Пермь, 614068, Россия
E-mail: mitrakovanatalya@mail.ru

Меньшикова Елена Александровна, доктор геолого-минералогических наук, доцент, заведующий кафедрой минералогии и петрографии геологического факультета, ведущий научный сотрудник Естественнонаучного института

Пермский государственный национальный исследовательский университет
ул. Букирева, д. 15, г. Пермь, 614068, Россия
E-mail: menshikova_e@list.ru

Хайрулина Елена Александровна, доктор географических наук, доцент, заведующий лабораторией биогеохимии техногенных ландшафтов, директор Естественнонаучного института

Пермский государственный национальный исследовательский университет
ул. Букирева, д. 15, г. Пермь, 614068, Россия
E-mail: elenakhay@gmail.com

Порошина Наталья Витальевна, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии техногенных ландшафтов Естественнонаучного института

Пермский государственный национальный исследовательский университет
ул. Букирева, д. 15, г. Пермь, 614068, Россия
E-mail: navit1@yandex.ru

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2542-064X.2024.2.324-341

Diagnostics of Acid Sulfate Soils in a Coal Mining Area of the Taiga Zone*N.V. Mitrakova**, *E.A. Menshikova*** , *E.A. Khayrulina**** , *N.V. Poroshina******Perm State University, Perm, 614068 Russia**E-mail: *mitrakovanatalya@mail.ru, **menshikova_e@list.ru, ***elenakhay@gmail.com, ****navit1@yandex.ru*

Received September 25, 2023; Accepted December 27, 2023

Abstract

Technogenic soils result from the oxidation and hydrolysis of minerals in rocks extracted from mining areas and brought to the surface. Diagnostics of such soils involve a set of detailed tests, which can be both time-consuming and costly. In this study, the pH of sulfate soils in the Kizel Coal Basin (Perm krai, Russia) was determined using hydrogen peroxide. Particularly, the soils affected by runoff from rock dumps, outflow, and mine water discharge were examined. The findings showed pH-H₂O₂ below 2.5 in certain horizons, indicating the presence of sulfides. Additionally, the soils exhibited significantly higher levels of mobile sulfur and iron, total sulfur, and sulfates, ranging from tens to hundreds of times above the background content. XRD analysis revealed that the soils contained goethite and jarosite, thereby confirming the efficacy of pH determination with hydrogen peroxide for the prompt diagnostics of acid sulfate soils.

Keywords: Kizel Coal Basin, coal, acid sulfate soils, acidity, goethite, jarosite

Acknowledgments. This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FSNF-2020-0021) and the Perm Scientific and Educational Center “Rational Subsoil Use” (2023).

Conflicts of Interest. The authors declare no conflicts of interest.

Figure Captions

Fig. 1. Chemical parameters of soils: *a* – mobile sulfur content; *b* – total mobile iron content; *c* – SO₄²⁻ content; *d* – gross sulfur content. Soils: SP – sod-podzolic soil buried under the technogenic soil layer; T – technosol; GH – gray-humus ortsteinic gleyic clayey technosol; GHCh – gray-humus chemically transformed soil; GHT – grey-humus technogenically transformed soil on the runoff from the rock dump; B – background soils.

Fig. 2. Soil acidity: *a* – pH-H₂O; *b* – hydrolytic acidity; *c* – organic matter content; *d* – pH-H₂O₂; *e* – exchangeable acidity; *f* – exchangeable aluminum content. See Fig. 1 for soil type designations.

Fig. 3. pH-H₂O₂ distribution across the technogenic soil profiles.

Fig. 4. Results of the XRD analysis of technosol (*a*) and sod-podzolic soil buried under the technogenic soil layer (*b*). PFS – potassium feldspar.

References

1. Rouhani A., Gusiatiin M.Z., Hejcman M. An overview of the impacts of coal mining and processing on soil: Assessment, monitoring, and challenges in the Czech Republic. *Environ. Geochem. Health*, 2023, vol. 45, no. 11, pp. 7459–7490. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01700-x>.
2. Abliz A., Shi Q., Keyimu M., Sawut R. Spatial distribution, source, and risk assessment of soil toxic metals in the coal-mining region of northwestern China. *Arabian J. Geosci.*, 2018, vol. 11, no. 24, art. 793. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4152-8>.

3. Ribeiro J., Flores D. Occurrence, leaching, and mobility of major and trace elements in a coal mining waste dump: The case of Douro Coalfield, Portugal. *Energy Geosci.*, 2021, vol. 2, no. 2, pp. 121–128. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2020.09.005>.
4. Thomas G., Sheridan C., Holm P.E. Arsenic contamination and rare earth element composition of acid mine drainage impacted soils from South Africa. *Miner. Eng.*, 2023, vol. 203, art. 108288. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108288>.
5. Nordstrom K.D., Blowes D.W., Ptacek C.J. Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: An update. *Appl. Geochem.*, 2015, vol. 57, pp. 3–16. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.02.008>.
6. Maksimovich N.G., Pyankov S.V. *Kizelovskii ugol'nyi bassein: ekologicheskie problemy i puti resheniya* [Kizel Coal Basin: Ecological Problems and Solutions]. Perm, Permsk. Gos. Nats. Issled. Univ., 2018. 288 p. (In Russian)
7. 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 Brief*, 2021, vol. 35, art. 106817. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.106817>.
8. Mitrakova N.V., Khayrulina E.A., Blinov S.M., Perevoshchikova A.A. Efficiency of acid sulphate reclamation in coal mining areas. *J. Min. Inst.*, 2023, vol. 260, no. 2, pp. 266–278. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.31>.
9. Alvarenga P., Mourinha C., Palma P., Cruz N., Rodrigues S.M. Assessment of soil physicochemical characteristics and As, Cu, Pb and Zn contamination in non-active mines at the Portuguese sector of the Iberian Pyrite Belt. *Environments*, 2022, vol. 9, no. 8, art. 105. <https://doi.org/10.3390/environments9080105>.
10. Mimba M.E., Mbafor P.U.T., Fils S.C.N., Nforba M.T. Environmental impact of artisanal and small-scale gold mining in East Cameroon, Sub-Saharan Africa: An overview. *Ore Energy Resour. Geol.*, 2023, vol. 15, art. 100031. <https://doi.org/10.1016/j.oreoa.2023.100031>.
11. Fernández-Caliani J.C., Barba-Brioso C., González I., Galán E. Heavy metal pollution in soils around the abandoned mine sites of the Iberian Pyrite Belt (Southwest Spain). *Water, Air, Soil Pollut.*, 2009, vol. 200, nos. 1–4. P. 211–226. <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9905-7>.
12. Solntseva N.P., Rubilina N.E., Gerasimova M.I., Alistratov S.V. Alteration of the morphology of leached chernozems in a coal-mining district. *Eurasian Soil Sci.*, 1992, vol. 24, no. 4, pp. 46–58.
13. Kostin A., Krechetov P., Chernitsova O. Alteration of physico chemical and morphological characteristics of sod-podzolic soils in technogenically-affected landscapes of Moscow Brown Coal Basin. *Mine Water: Technological and Ecological Challenges: Proc. IMWA 2019 Conf. (Perm, July 15–19, 2019)*. Perm, Perm State Univ., 2019, pp. 725–731.
14. 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, no. 4, art. 364. <https://doi.org/10.3390/min10040364>.
15. Ushakova E., Menshikova E., Blinov S., Osovetsky B., Belkin P. 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, no. 5, art. 727. <https://doi.org/10.3390/w14050727>.
16. Imaykin A.K., Imaykin K.K. *Gidrogeologicheskie usloviya Kizelovskogo ugol'nogo basseina vo vremya i posle okonchaniya ego ekspluatatsii, prognoz ikh izmenenii* [Hydrogeological Conditions of the Kizel Coal Basin during and after of Its Exploitation, Prediction of Their Changes]. Perm, Permsk. Gos. Nats. Issled. Univ., 2013. 112 p. (In Russian)
17. Barthen R., Sulonen M.L.K., Peräniemi S., Jain R., Lakaniemi A.-M. Removal and recovery of metal ions from acidic multi-metal mine water using waste digested activated sludge as biosorbent. *Hydrometallurgy*, 2022, vol. 207, art. 105770. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105770>.
18. Fitzpatrick R., Shand P. (Eds.) *Inland Acid Sulfate Soil Systems across Australia*. CRC LEME Open File Report 249. Perth, CRC LEME, 2008. 303 p.
19. Nyman A., Johnson A., Yu C., Sohlenius G., Becher M., Dopson M., Åström M. A nationwide acid sulfate soil study – a rapid and cost-efficient approach for characterizing large-scale features. *Sci. Total Environ.*, 2023, vol. 869, art. 161845. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161845>.

20. Salo H., Virtanen S., Laine-Kaulio H., Koivusalo H., Jacques D., Kokkonen T. Evolution of pH, redox potential and solute concentrations in soil and drainage water at a cultivated acid sulfate soil profile. *Geoderma*, 2023, vol. 436, art. 116559. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116559>.
21. Boman A., Åström M., Fröjdö S. Sulfur dynamics in boreal acid sulfate soils rich in metastable iron sulfide – the role of artificial drainage. *Chem. Geol.*, 2008, vol. 255, nos. 1–2, pp. 68–77. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.06.006>.
22. Bigham J.M., Schwertmann U., Traina S.J., Winland R.L., Wolf M. Schwertmannite and the chemical modeling of iron in acid sulfate waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1996, vol. 60, no. 12, pp. 2111–2121. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(96\)00091-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(96)00091-9).
23. Vithana C.L., Sullivan L.A., Burton E.D., Bush R.T. Stability of schwertmannite and jarosite in an acidic landscape: Prolonged field incubation. *Geoderma*, 2015, vols. 239–240, pp. 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.09.022>.
24. Trueman A.M., McLaughlin M.J., Mosley L.M., Fitzpatrick R.W. Composition and dissolution kinetics of jarosite-rich segregations extracted from an acid sulfate soil with sulfuric material. *Chem. Geol.*, 2020, vol. 543, art. 119606. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119606>.
25. Lin C., Melville M.D. Acid sulphate soil-landscape relationships in the Pearl River Delta, southern China. *Catena*, 1994, vol. 22, no. 2, pp. 105–120. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(94\)90020-5](https://doi.org/10.1016/0341-8162(94)90020-5).
26. Sullivan L., Ward N., Toppler N., Lancaster G. *National Acid Sulfate Soils Guidance: National Acid Sulfate Soils Sampling and Identification Methods Manual*. Water Quality Australia. Canberra, Dep. Agric. Water Resour., 2018. 62 p.
27. Creeper N., Fitzpatrick R., Shand P., Self P., Kingham R. A systematic analysis procedure incorporating the chip-tray incubation method for the hazard assessment of Acid Sulfate Soils in the Murray-Darling Basin. *Proc. 19th World Congr. of Soil Science; Soil Solutions for a Changing World (Brisbane, August 1–6, 2010)*. Brisbane, Int. Union of Soil Sci., 2010, pp. 75–78.
28. Hulisz P., Rożański S.Ł., Boman A., Rauchfleisz M. Can acid sulfate soils from the southern Baltic zone be a source of potentially toxic elements (PTEs)? *Sci. Total Environ.*, 2022, vol. 825, art. 154003. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154003>.
29. Bargrizan S., Smernik R.J., Fitzpatrick R.W., Mosley L.M. The application of a spectrophotometric method to determine pH in acidic (pH < 5) soils. *Talanta*, 2018, vol. 186, pp. 421–426. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.04.074>.
30. Vorob'eva L.A. *Teoriya i praktika khimicheskogo analiza pochv* [Theory and Practice of Soils Chemical Analysis]. Moscow, GEOS, 2006. 400 p. (In Russian)
31. Arinushkina E.V. *Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv* [Handbook on Soils Chemical Analysis]. 2nd ed. Moscow, Izd. Mosk. Univ., 1970. 488 p. (In Russian)
32. State Standard 26485-85. Soils. Determination of exchangeable (mobile) aluminium by CINAO method. Moscow, Izd. Standartov, 1985. 5 p. (In Russian)
33. State Standard 27395-87. Soils. Determination of mobile two- and trivalent iron compounds by Verigina–Arinushkina method. Moscow, Izd. Standartov, 1987. 11 p. (In Russian)
34. State Standard 26426-85. Soils. Methods for determination of sulphate ion in water extract. Moscow, Izd. Standartov, 1985. 7 p. (In Russian)
35. State Standard 26490-85. Soils. Determination of mobile sulfur by CINAO method. Moscow, Izd. Standartov, 1985. 4 p. (In Russian)
36. Federal Environmental Regulation 16.1:2.2:3.37-2002. Quantitative chemical analysis of soils. Measuring the gross sulfur content in soils, soils, bottom sediments, and waste by the turbidimetric method. Moscow, 2002. 18 p. (In Russian)
37. Brinkman R., Pons L.J. Recognition and prediction of acid sulphate soil conditions. *Acid Sulphate Soils: Proc. Int. Symp. on Acid Sulphate Soils*. Dost H. (Ed.). Publ. 18. Vol. 1. Wageningen, Int. Inst. Land Reclam. Improv., 1973, pp. 169–203.
38. Kostin A.S., Krechetov P.P. Transformation of soils in the area affected by mine dumps of the Moscow Brown Coal Basin. *Pochvy i zemel'nye resursy: sovremennoe sostoyanie, problemy ratsional'nogo ispol'zovaniya, geoinformatsionnoe kartografirovaniye: materialy mezhdunarodnoi nauchno-*

prakticheskoi konferentsii [Soils and Land Resources: Current State, Problems of Sustainable Use, and Geoinformation Mapping: Proc. Int. Sci.-Pract. Conf.]. Minsk, Belarus. Gos. Univ., 2018, pp. 213–219. (In Russian)

39. Uzarowicz L., Skiba S. Technogenic soils developed on mine spoils containing iron sulphides: Mineral transformations as an indicator of pedogenesis. *Geoderma*, 2011, vol. 163, nos. 1–2, pp. 95–108. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.04.008>.
40. Zvereva V.P., Frolov K.R., Lysenko A.I. Chemical reactions and conditions of mineral formation at tailings storage facilities of the Russian Far East. *Gorn. Nauki Tekhnol.*, 2021, vol. 6, no. 3, pp. 181–191. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-3-181-191>.

Для цитирования: Митракова Н.В., Меньшикова Е.А., Хайрулина Е.А., Порошина Н.В. Диагностика кислых сульфатных почв в угледобывающем районе в таежной зоне // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2024. Т. 166, кн. 2. С. 324–341. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2024.2.324-341>.

For citation: Mitrakova N.V., Menshikova E.A., Khayrulina E.A., Poroshina N.V. Diagnostics of acid sulfate soils in a coal mining area of the taiga zone. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2024, vol. 166, no. 2, pp. 324–341. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2024.2.324-341>. (In Russian)