

THE NEED TO DEVELOP A MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF THE BLOCK METHOD OF DEVELOPING CAREER FIELDS

V.V. AKSENOV ^{1,2}, Dr Sc., A.V. SELYUKOV ², Dr Sc.,
D.A. PASHKOV ², Cand. Sc, A.V. GERASIMOV ², Graduate Student

¹ Institute of Coal FRCCCh of SBR of RAS,
10, Leningrad ave., Kemerovo, 650610, e-mail: 55vva42@mail.ru

² T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
28, Vesennaya str., Kemerovo, 650000

The features of existing technological solutions for mining formations of inclined and steeply falling strata are considered, and their disadvantages are identified. The features of the block method of mining formations of inclined and steeply falling strata are presented. It is noted that when working out a career field using the block method, the lack of scientific, technical and methodological developments aimed at substantiating the parameters of the blocks is a limiting factor. To determine these parameters and factors, it is necessary to develop a mathematical model for determining the parameters of the block method.

Keywords: open-pit mining, external waste dumping, quarry field, development system, mathematical model for determining the parameters of the block method, block method, suite of layers.

Поступила в редакцию/received: 06.02.2025; после рецензирования/revised: 14.02.2025;
принята/accepted: 17.02.2025

УДК 504.55:504.064:502.57(470.331)

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ ОСВОЕНИЯ ПОРОДНЫХ ОТВАЛОВ ЛИКВИДИРОВАННЫХ ШАХТ НЕЛИДОВСКОГО БУРОУГОЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Л.В. ЛОБАЧЕВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: firslud@mail.ru

© Лобачева Л.В., 2025

Проанализированы особенности породного отвала. Представлены результаты изучения проблемы накопления и воздействия отходов добычи бурого угля, складываемых в отвалах (техногенных образованиях) ликвидированных шахт, на окружающую среду, а также исследования отвальной породы и проб грунта на содержание соединений тяжелых металлов и уровня активной реакции среды (рН). Дана оценка влияния техногенных месторождений на водные объекты, находящиеся в зоне техногенного образования. Обоснованы необходимость и возможность рационального освоения породных отвалов ликвидированных шахт.

Ключевые слова: породный отвал, горнопромышленные отходы, комплексное освоение, тяжелые металлы, террикон, поллютанты, техногенное месторождение.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-2-57-65

ВВЕДЕНИЕ

За последнее столетие на территории РФ из-за хозяйственной деятельности горных предприятий, которые на данный момент ликвидированы, образовалось огромное количество техногенных месторождений, которые являются объектами накопленного вреда окружающей среде [1–3]. Указанные месторождения представляют собой места складирования отходов добычи и обогащения полезных ископаемых, возникновение которых в большинстве случаев было обусловлено несовершенством технологий отвалообразования и обогащения минерального сырья [3].

В ходе многолетней деятельности предприятий горнопромышленные отходы стали источником техногенного воздействия на окружающую среду; полное устранение таких отходов требует существенных материальных затрат [1]. Ситуация осложняется еще и тем, что часто породные отвалы расположены в непосредственной близости от населенных пунктов [3].

Многие горные предприятия РФ в 90-е гг. XX в. не смогли преодолеть экономические трудности, обанкротились и в итоге были закрыты. Консервация породных отвалов ликвидированных организаций не была проведена. Фактически данные отвалы были брошены и никак не контролировались, что ухудшило экологическую ситуацию в зоне влияния техногенных образований из-за высокого содержания в последних токсичных соединений [1–3]. Отметим, что многие отечественные [2, 4–7] и зарубежные исследователи [8–10] признают: техногенные месторождения обладают значительными запасами ценного минерального сырья, рациональная переработка которого позволит снизить объемы потребления невозобновимых природных минеральных ресурсов. Следовательно, необходимы комплексный подход к изучению породных отвалов ликвидированных шахт, создание геотехнологий их правильного освоения с последующей рекультивацией, что обеспечит экологическую безопасность техногенных образований [3, 6, 11]. Поэтому цель нашего исследования состояла в установлении необходимости и возможности реализации породных отвалов ликвидированных шахт Нелидовского бурого угольного месторождения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования – породный отвал месторождения бурого угля ликвидированного в 1998 г. горнопромышленного предприятия, расположенного в Нелидовском районе Тверской области.

Нелидовское месторождение относится к Подмосковному бурого угольному бассейну и по инженерно-геологическим условиям принадлежит к месторождениям средней категории сложности. Условия являются трудными, неблагоприятными из-за наличия в кровле и почве угольного пласта песков, обладающих плавунными свойствами, неустойчивых глин, вызывающих пучение почвы. На указанном месторождении распространены преимущественно гумусовые разновидности угля (дюрен, кларено-дюрен и кларен), реже встречаются гумусово-сапропелевые виды. Отмечают непостоянство химического состава угля как следствие его неоднородности [12–14].

Добыча угля на Нелидовском месторождении осуществлялась закрытым (шахтным) способом и в результате сформировались отвалы (терриконы) конической формы, отличающиеся по своему составу от фоновых пород. После закрытия горнодобывающего предприятия техногенные массивы остались фактически бесхозными, консервация их не была проведена. Положение, как мы отмечали выше, усугубляется тем, что породный отвал расположен вблизи населенного пункта и является источником устойчивой долговременной техногенной нагрузки на окружающую среду.

Исследование включало два этапа. Сначала для обоснования необходимости применения геотехнологий освоения породного отвала проводилась оценка накопленного экологического вреда на прилегающей территории, состоящая в рекогносцировочном изучении грунта и водных объектов в границах влияния отвала, расположенного на северной окраине Нелидово [15].

Работы проводились на ключевых участках вблизи отвала нелидовских шахт, а также в реке Каменке и озерах, находящихся на северо-западной и южной сторонах от объекта (рис. 1).

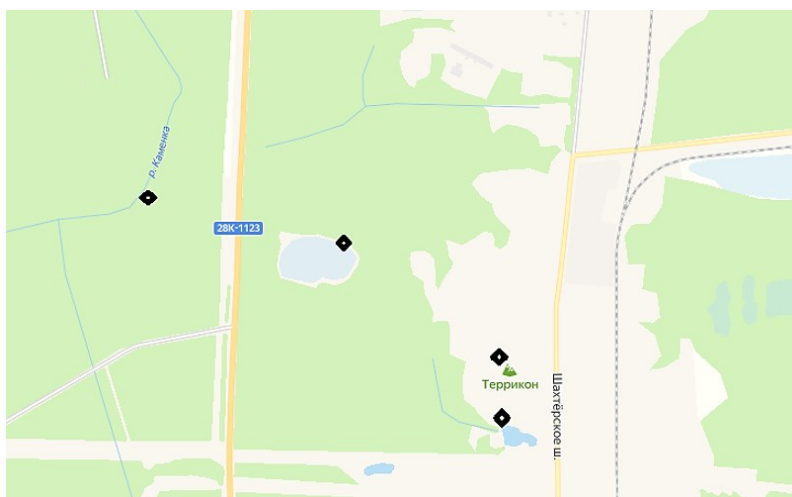


Рис. 1. Карта-схема отбора проб вблизи отвала (террикона) нелидовских шахт [16]

В пробах образцов почв и вскрышных пород террикона определяли активную кислотность (рН) потенциометрическим методом, обменную кислотность – методом Соколова, электропроводность – кондуктометрическим методом, содержание тяжелых металлов – по стандартной методике [17–19].

Были проанализированы такие показатели пробы воды, как водородный (рН), цветность, мутность, гидрокарбонаты, окисляемость бихроматная, нефтепродукты, аммоний, хлориды, нитриты, сульфаты, нитраты, фториды, фосфаты, железо общее, марганец, цинк, кадмий, свинец, медь, ртуть, мышьяк, калий, натрий, литий, магний, стронций, барий, кальций, растворенный углекислый газ, жесткость, минерализация по стандартным методикам [15].

На втором этапе проводилась оценка возможности применения технологий освоения породного отвала ликвидированного нелидовского горнопромышленного предприятия. Обоснование возможности освоения техногенного образования основано на изучении физико-химических свойств и состоянии горной массы, что позволит выбрать рациональную геотехнологию переработки отходов горнодобывающей компании.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Многолетнее формирование породного отвала нелидовских шахт привело к изменению качества объектов окружающей среды и трансформации свойств складированной горной массы.

Коническая форма отвала способствовала развитию на незадернованных склонах физического выветривания, водной эрозии за счет поверхностного стока талых и дождевых вод. В результате произошли смывание токсичной (сернокислой за счет окисления пирита) породы и формирование техногенных наносов и конусов выноса (шлейфов) у подножья террикона (рис. 2) протяженностью до нескольких сотен метров [20–21].



Рис. 2. Породные отходы Нелидовского месторождения

Образование конусов выноса происходит, когда отвал при наличии повышенной увлажненности достигает своей критической высоты с возникновением интенсивного бокового расприания и выдавливанием слоя горной массы в нижние части массива. В этом случае углы внутреннего трения уменьшаются до минимальных значений.

При формировании техногенных массивов необходимо проводить расчет устойчивости отвалов на основании методов, учитывающих нормативные требования к таким объектам [22].

В предлагаемых методиках [22] предельное равновесие определяется с учетом наличия в основании слабого слоя и силы бокового расприания F при достижении техногенным массивом критической высоты (рис. 3). В случае отрицательных и положительных значений углов наклона основания данного массива β коэффициент запаса устойчивости η устанавливают с помощью зависимости

$$\eta = \frac{\left[B \sin\left(45 + \frac{\varphi}{2} - \beta\right) + \gamma S_2 \cos \beta \right] \operatorname{tg} \varphi_k + \rho_k(k_1 - k_2)}{B \sin\left(45 - \frac{\varphi}{2} - \beta\right) - \gamma S_2 \cos \beta + FK_p},$$

где B – направление реакций, совпадающих с наклоном площадок скольжения в основании последующего блока; φ , φ_k – углы внутреннего трения верхней и нижней части отвала соответственно, град.; ρ_k – удельное сцепление нижней части отвала, т/м³; S_2 – площадь призмы упора, включая слабый слой, м²; F – боковое расприание, т/м²; K_p – коэффициент бокового расприания; γ – плотность пород, т/м³.

Направление реакций находят по уравнению

$$B = gS_1 \sin\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right) - \gamma S_2 \cos\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right) \operatorname{tg} \varphi - \rho(K - G),$$

где ρ – удельное сцепление верхней части отвала, т/м³; S_1 – площадь призмы активного давления, м²; g – масса породы, т; H – высота отвала, м; K , G – геометрические характеристики отвала, м.

Значения геометрических характеристик отвала β , K , G , B , R , k_1 , k_2 определяют из расчетной схемы (рис. 3).

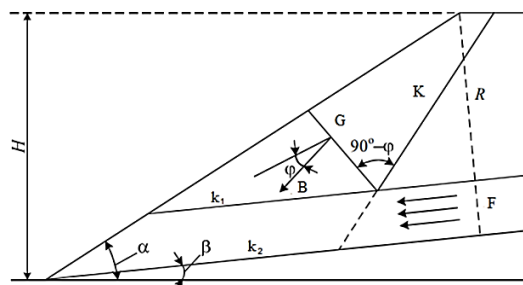


Рис. 3. Схема к расчету устойчивости породных отвалов:
 α – угол наклона основания отвала, град.

Устойчивость откосов техногенного массива зависит от серьезных факторов природного и техногенного происхождения, поэтому расчет коэффициента устойчивости отвала представляет собой непростую задачу. Наиболее сложно найти коэффициент бокового распираия, значение которого в зернистой среде может изменяться в диапазоне от 0 до 0,41 [22].

В процессе формирования конуса выноса техногенных наносов исследуемого породного отвала происходит формирование дерново-подзолистых техногенно-трансформированных почв, под шлейфом которого находятся дерново-подзолистые почвы с $pH = 5,2$.

Проведенные исследования показали: породная масса имеет сильноокислую реакцию среды ($pH = 2,4 \dots 3,1$), возникшую из-за образования серной кислоты и сульфата железа при окислении пирита. Техногенные грунты имеют значительный уровень электропроводности (до 504 $\mu S/cm$); концентрации тяжелых металлов практически не превышают нормативных значений, что подтверждает наличие процессов выщелачивания химических веществ при низких значениях pH грунта. Дерново-подзолистые и условно фоновые почвы характеризуются меньшим содержанием тяжелых металлов и значением электропроводности (51 $\mu S/cm$), чем отвальная порода (табл. 1).

Таблица 1. Значение pH и содержание тяжелых металлов в отвальной породе и почве

Грунт	Электро-проводность, $\mu S/cm$	pH	Содержание тяжелых металлов, мг/кг				
			Zn	Cd	Cu	Sr	Mn
Техногенный (отвальная порода)	290...504	2,4...3,1	21,4...26,8	4,5...10,1	8,8...12,5	19,2...34,8	10,3...38,3
Условно фоновый (дерново-подзолистая почва)	51	5,2	16,8	3,9	6,2	5,4	11,3

Результаты изучения озер, расположенных в зоне влияния породных отвалов (табл. 2), позволили выявить в отобранных пробах воды превышение предельно-допустимых концентраций загрязняющих веществ с 6 до 70 раз и низкие значения активной реакции среды ($pH = 3,9 \dots 4,0$). В реке Каменке превышений допустимых значений концентраций поллютантов не зафиксировано.

Таблица 2. Значение pH и содержание тяжелых металлов в водных объектах

Место, откуда был взят грунт	pH	Содержание тяжелых металлов, мг/кг				
		Zn	Cd	Cu	Sr	Mn
Река Каменка	7,1	0,003...0,005	0,002...0,004	0,0011...0,0015	0,01...0,028	0,007...0,008
Озера	3,9...4,0	0,2...0,62	0,048...0,067	0,024...0,033	2,1...2,72	0,16...0,22

Формирование литохимических и гидрохимических ореолов загрязнения связано с процессами вымывания и последующей миграцией по природным транспортным каналам загрязняющих компонентов отвальной породы. В результате нарушаются плодородие почв, качество воды водных объектов; наблюдаются процессы, мешающие растительности, вследствие чего вокруг террикона возникает техногенная пустыня.

Для повышения безопасности и реабилитации земель территории Нелидовского бурогоугольного месторождения необходимо использовать геотехнологические подходы к его освоению с последующей рекультивацией породных отвалов ликвидированных шахт. Это направление характеризуется наличием четырех аспектов:

- 1) изучение проблемы восстановления земель должно осуществляться в целом для территорий, нарушенных в процессе добычи полезных ископаемых;
- 2) необходимо установление условий формирования, складирования и хранения горнопромышленных отходов;
- 3) нужно исследовать свойства отвальной породы с целью выявления сохранности ценных компонентов долго лежавшей горной массы;
- 4) требуется анализ возможности перевода объекта складирования горнопромышленных отходов в категорию техногенного месторождения на основании технико-экономической оценки запасов сырья.

Современные подходы при выборе стратегии освоения техногенных месторождений основаны на сочетании физико-технической и физико-химической геотехнологий. Первая базируется на применении методов, заключающихся в извлечении полезных компонентов без изменения агрегатного состояния и химических свойств сырья и дальнейшего применения механического и буровзрывного способов его отделения от техногенного массива. Вторая технология подразумевает использование тепловых, массообменных, химических процессов для перевода ценного компонента отвальной массы в подвижное состояние. Рациональная комбинация геотехнологий обеспечит комплексное освоение породных отвалов и позволит снизить техногенную нагрузку на окружающую среду [23].

Технологии комплексного освоения породных отвалов ликвидированных горнопромышленных предприятий должны соответствовать принципам устойчивого

развития территорий и реализовываться с учетом экономических, эколого-релевантных и социальных факторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На постэксплуатационном этапе функционирования нелидовских шахт вмещающие породы отвала из-за длительного нахождения на поверхности подвергались процессам физического выветривания и водной эрозии, что вызвало миграцию на прилегающие территории техногенных наносов, поллютантов и кислотных растворов. В результате сформировались конусы выноса складировемых отходов добычи, отличающиеся неоднородность состава и свойств. Важной характеристикой, обеспечивающей безопасность складирования горной массы, является устойчивость отвала, определяемая с учетом нормативных требований к отвалообразованию.

Вскрышные породы Нелидовского месторождения отличаются (по сравнению с природными почвами) сильноокислой средой ($pH = 2,4 \dots 3,1$) и малым содержанием тяжелых металлов, что связано с процессами выщелачивания загрязнителей из горной массы.

Водные объекты, непосредственно прилегающие к террикону, характеризуются низкими значениями кислотности ($pH = 3,9 \dots 4,0$), а содержание тяжелых металлов в воде в 70 раз превышает предельно-допустимые концентрации. Причина последнего состоит в поступлении поллютантов породной массы в объекты окружающей среды, наличие данных веществ вызвало деградацию этих объектов.

Высокая техногенная нагрузка на прилегающую к ликвидированным нелидовским шахтам территорию обуславливает необходимость применения геотехнологий освоения техногенных месторождений, позволяющих снизить накопленный экологический вред окружающей среде.

Для обоснования геотехнологической направленности комплексного освоения техногенных месторождений необходимо установить минеральный, химический состав, распределение ценных компонентов в отвальной породе, изучить процессы преобразования техногенного сырья.

Таким образом, стратегия комплексного освоения породных отвалов ликвидированных горнопромышленных предприятий должна базироваться на применении рациональных геотехнологий, основанных на комбинации процессов физико-технического и физико-химического извлечения полезных компонентов техногенного сырья, что позволит расширить возможности использования отходов угледобычи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болтыров В.Б., Стороженко Л.А., Сапсай М.А. Накопленный экологический вред территорий размещения горнопромышленных отходов прошлых лет // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021. № 5–2. С. 202–217. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nakoplennyy-ekologicheskiy-vred-territoriy-razmescheniya-gornopromyshlennyh-othodov-proshlyh-let/viewer> (дата обращения: 01.02.2025).

2. Илимбетов А.Ф., Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Разработка технологии формирования и комплексного освоения техногенных месторождений на основе отходов переработки руд // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2008. № 4. С. 247–256.

3. Крупская Л.Т., Зверева В.П., Слярова Г.Ф., Орлов А.М. Техногенные поверхностные образования как источник загрязнения экосферы и обоснование

возможности их освоения в Дальневосточном федеральном округе // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021. № 2. С. 5–21. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnogennye-poverhnostnye-obrazovaniya-kak-istochnik-zagryazneniya-ekosfery-i-obosnovanie-vozmozhnosti-ih-osvoeniya-v/viewer> (дата обращения: 01.02.2025).

4. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Развитие теории проектирования и реализации идей комплексного освоения недр // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2008. № 4. С. 20–41.

5. Качурин Н.М., Зоркин И.Е., Мосина Е.К. Геотехнология комплексного освоения месторождений бурого угля // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2013. Вып. 1. С. 119–130.

6. Захаров Е.И., Маликов А.А., Фридлендер Г.В., Ганин М.П. Геотехнологии комплексного освоения угольных и техногенных месторождений Подмосковского угольного бассейна // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2020. Вып. 2. С. 238–247.

7. Макаров А.Б., Талалай А.Г., Хасанова Г.Г. Геолого-промышленные типы техногенных месторождений // *Вестник Института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН*. 2018. № 8 (284). С. 39–45.

8. Noviks G. Eco-innovative solutions for the processing of technogenic mineral resources // *Environment. Technology. Resources. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. 2019. V. 1. P. 204–209.

9. Abay A., Imbuga M., Malik Ch., Singh K., Borodin D. Geo-Resources Recycling as the Way of Mining Wastes Disposing // *International Innovative Mining Symposium*. 2018. V. 41. P. 02010.

10. Sapsford D., Cleall P., Harbottle M. In situ resource recovery from waste repositories: exploring the potential for mobilization and capture of metals from anthropogenic ores // *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2017. V. 3. № 2. P. 375–392.

11. Макаров А.Б., Хасанова Г.Г., Талалай А.Г. Техногенные месторождения: особенности исследования // *Известия Уральского государственного горного университета*. 2019. Вып. 3 (55). С. 58–62.

12. Геологическое описание Нелидово-Селижаровского угленосного района. URL: <https://industrial-wood.ru/geologiya-mestorozhdeniy-uglya/15669-geologicheskoe-opisanie-nelidovo-selizharovskogo-uglenosnogo-rayona.html> (дата обращения: 01.02.2025).

13. Калаева С.З., Богданов С.М., Лукин Н.О., Огер А.А. Породные отвалы угольных шахт России // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2016. № 1. С. 3–23.

14. Подмосковский угольный бассейн / под общ. ред. В.А. Потапенко. Тула: Гриф и К°, 2000. 276 с.

15. Лобачева Л.В., Левинский В.В. Исследование воздействия отходов добычи бурого угля на окружающую среду // *Экология и безопасность жизнедеятельности: Сборник статей XXIII Международной научно-практической конференции* / ред.: В.А. Селезнев, И.А. Лушкин. Пенза: Пензенский ГАУ, 2023. С. 236–239.

16. Тверская область. Террикон поселка Нелидово. URL: <https://yandex.ru/maps/geo/terrikon/5866397347/?ll=32.782915%2C56.244153&z=15> (дата обращения: 03.02.2025).

17. ГОСТ Р 59248-2020. Угли бурые, каменные, антрацит, горячие сланцы и угольные брикеты. Методы отбора и подготовки проб для лабораторных испытаний. М.: Стандартинформ, 2021. 12 с.

18. ГОСТ Р 55660-2013. Топливо твердое минеральное. Определение выхода летучих веществ. М.: Стандартинформ, 2019. 14 с.

19. ПНД Ф 12.1:2.2:2.3:3.2-03. Отбор проб почв, грунтов, донных отложений, илов, осадков сточных вод, шламов промышленных сточных вод, отходов производства и потребления. М.: ФБУ «ФЦАО», 2014. 14 с.

20. Костин А.С., Кречетов П.П. Трансформация почв в зоне влияния отвалов Подмосковского бурогоугольного бассейна // *Почвы и земельные ресурсы: современное состояние, проблемы рационального использования, геоинформационное картографирование: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию кафедры почвоведения БГУ и 80-летию со дня рождения В.С. Аношко*. Минск: БГУ, 2018. С. 213–219.

21. Солнцева Н.П., Рубилина Н.Е. Морфология почв, трансформированных при угледобыче // *Почвоведение*. 1987. № 2. С. 104–108.

22. Гребенкин С.С., Буряк Д.С., Розанова Е.Н. Влияние породных отвалов закрывающихся шахт на состояние объектов окружающей среды // *Научный вестник НИИГД «Респиратор»*. 2016. № 1 (53). С. 74–81.

23. Валиев Н.Г., Славиковский О.В. Исследование технологии комплексного извлечения минеральных ресурсов недр и техногенных образований // *Известия вузов. Горный журнал*. 2014. № 6. С. 22–26.

Для цитирования: Лобачева Л.В. Обоснование необходимости и возможности освоения породных отвалов ликвидированных шахт Нелидовского бурогоугольного месторождения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 2 (26). С. 57–65.

JUSTIFICATION OF TECHNOLOGY FOR INTEGRATED DEVELOPMENT OF TECHNOGENIC BROWN COAL DEPOSITS

L.V. LOBACHEVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: firslud@mail.ru

The features of the waste dump are analyzed. The results of the study of the problem of accumulation and impact of brown coal mining waste stored in dumps (technogenic formations) of abandoned mines on the environment are presented, as well as the study of waste dumps and soil samples for the content of heavy metal compounds and the level of active reaction of the environment (pH). An assessment of the impact of technogenic deposits on water bodies located in the zone of technogenic formation is given. The necessity and possibility of rational development of waste dumps of abandoned mines are substantiated.

Keywords: rock dump, mining waste, integrated development, heavy metals, spoil heap, pollutants, technogenic deposit.

Поступила в редакцию/received: 12.02.2025; после рецензирования/revised: 14.02.2025;
принята/accepted: 17.02.2025