

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГОРНЫЕ НАУКИ

УДК 622:504.55: 502.57

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-4-29-37

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КОНСЕРВАЦИИ ПОРОДНЫХ ОТВАЛОВ БУРОГО УГЛЯ С ЦЕЛЬЮ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ И СОХРАНЕНИЯ РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА НЕДР

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

Рассмотрены основные подходы к разработке технологий консервации техногенных месторождений добычи бурого угля. Обоснованы технологические принципы консервации техногенных месторождений. Представлены результаты исследования техногенного сырья на содержание тяжелых металлов и уровень кислотности. Данна оценка геохимических изменений, повреждений земной поверхности в зоне влияния массива отходов. Предложена технология консервации породного отвала для комплексного освоения и сохранения ресурсного потенциала недр.

Ключевые слова: бурый уголь, углепородное сырье, породный отвал, техногенное месторождение, консервация, комплексное освоение месторождений, ресурсный потенциал, сорбенты.

ВВЕДЕНИЕ

В горнопромышленном комплексе, несмотря на разработку и внедрение современных технологий и способов добычи, на сегодняшний день ключевой остается проблема размещения техногенный образований (техногенных месторождений), основная масса которых сформирована в последние несколько десятилетий [1, 3]. К техногенным образованиям относятся массивы отходов добычи и переработки минерального сырья, основным методом обращения с которыми до сих пор является наземное складирование, исключающее на длительное время занятые ими территории из хозяйственного оборота и создающее угрозу для экологической безопасности в границах их влияния [3-5].

Положение усугубляется тем, что с 1994 года 203 шахты были ликвидированы в рамках реструктуризации угольной промышленности из-за их опасности и нерентабельности. В большинстве ликвидированных горных выработок не были выполнены комплексные технические мероприятия по консервации и рекультивации, что стало причиной трансформации техногенно-минерального сырья, снижения его ресурсного потенциала, а также большинства аварий, связанных с повреждением земной поверхности [4, 6].

Складируемые в породных отвалах ликвидированных шахт отходы зачастую экономически доступны для использования как вторичные материалы во многих отраслях промышленности, что способствует развитию эффективного ресурсо-сбережения. Кроме того, техногенные месторождения закрытых горных выработок, как

правило, находятся на территориях с развитой транспортной и инженерной инфраструктурой, где имеются потенциальные заказчики вторичных материалов, что может в какой-то степени обеспечить сырьевое импортозамещение и технологическую независимость отечественных предприятий [2].

В настоящее время для уменьшения негативного воздействия техногенных образований на окружающую среду проводится три группы мероприятий:

рекультивация, направленная на снижение уровня деградации земель и восстановление их хозяйственной ценности в соответствии с целевым назначением. Затраты на рекультивацию зависят от применяемой технологии, вида нарушений, типа нарушенных земель [7];

ликвидация, предполагающая переработку и извлечение ценных компонентов отвальной породы, используемых в различных отраслях промышленности. Необходимым условием проведением работ по данному направлению, является наличие свободного пространства (например, выработанного карьера) для размещения техногенного сырья. Кроме того, ликвидация является наиболее дорогостоящим, но и эффективным способом снижения накопленного вреда окружающей среде [7];

консервация, являющаяся оптимальным способом охраны нарушенных земель и предусматривающая решение двух задач: природоохранной, направленной на сокращение негативного воздействия техногенных массивов за счет их изоляции от агрессивных факторов окружающей природной среды и позволяющей сохранить их ресурсный потенциал, и промышленной, предполагающей при развитии современных технологий переработки и извлечении полезных компонентов применение комплекса мероприятий по ликвидации техногенных образований [7].

Актуальность выполнения работ по обоснованию и внедрению технологий консервации техногенных образований связана с необходимостью модернизации минерально-сырьевого комплекса РФ и соответствует стратегическим целям и задачам развития минерально-сырьевой базы РФ до 2035 года требующей разработки и внедрения современных геотехнологий, направленных на создание условий для комплексного освоения техногенных месторождений [8, 9].

В связи с вышеперечисленным целью работы является обоснование технологии консервации техногенных месторождений добычи бурого угля, способствующей комплексному освоению и сохранение ресурсного потенциала недр.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Разработка современных технологий консервации техногенных образований основана на комплексе геологических, гидрогеологических, геотехнологических исследований, позволяющих произвести последовательный ряд технических решений, обеспечивающих сохранность ресурсного потенциала, экологической стабильности и безопасности техногенных месторождений.

Объектом исследования является породный отвал бурого угля Нелидовского месторождения Подмосковного угольного бассейна, расположенного в южной части его западного сектора на территории Тверской области. Характерная особенность района добычи состоит в широком развитии ледниковых отложений и древних речных долин, местами разобщающих угольные залежи, что наряду с наличием многочисленных водоносных горизонтов определяет сложные гидрогеологические и горнотехнические условия эксплуатации месторождения [10].

Рельеф земной поверхности исследуемого района расположения техногенного образования волнистый, с небольшими холмистыми участками. Среднегодовое количество осадков составляет 500...700 мм в год, уровень показателя испаряемости

370...420 мм, что наряду со слабым уклоном земной поверхности способствует пополнению запасов подземных вод, а также интенсифицирует процессы выноса углепородной смеси по склону техногенного месторождения с поверхностными атмосферными водами [10, 11].

Разработка месторождения в этом районе проводилась с 1946 года и была прекращена в конце 1990-х годов в связи с нерентабельностью. Комплекс работ по ликвидации шахты «Нелидовская» был произведен в сокращенном формате, т. е. были устраниены только инфраструктурные объекты, а мероприятия по приведению территории горной выработки в безопасное состояние (рекультивация, консервация, ликвидация) не выполнялись.

Исследование включало два этапа, на которых для обоснования возможности и необходимости применения технологии консервации техногенного месторождения оценивались геохимические изменения, повреждения земной поверхности в зоне влияния массива отходов [12].

На первом этапе работ проводилась оценка состояния, уровня трансформации породного отвала Нелидовского месторождения и прилегающей территории. Был сделан отбор и анализ образцов углепородной смеси, проб грунта и воды озер, расположенных вблизи техногенного образования, на содержание тяжелых металлов и уровень кислотности грунта по стандартной методике [13–15].

Для исследования характера изменений поверхности породного отвала проводились натурные наблюдения и использовались данные спутниковых снимков [16].

На втором этапе на основании полученных результатов были предложены технологии и технические решения по консервации техногенного образования Нелидовского месторождений бурого угля.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для обоснования технологии консервации породного отвала Нелидовского месторождения анализировались данные мониторинговых исследований техногенного массива и прилегающей территории.

Для оценки геохимических изменений углепородной смеси отвала образцы грунта № 1–4 исследовались на содержание тяжелых металлов (рис. 1).

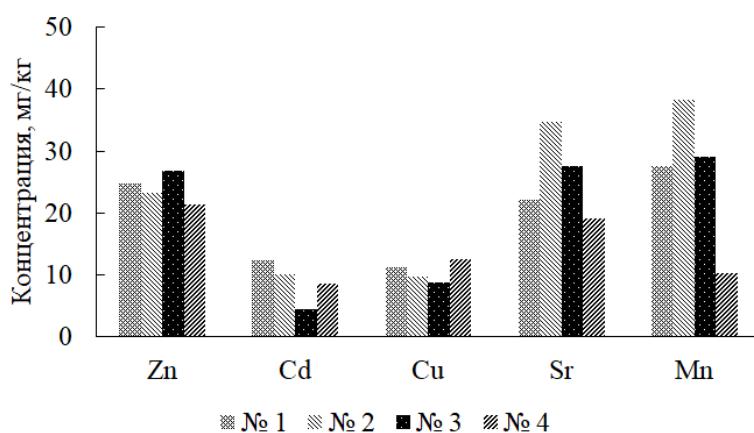


Рис. 1. Содержание тяжелых металлов в углепородной смеси

Химический анализ образцов грунта показал относительно невысокое содержание тяжелых металлов в отвальной породе, в основном ниже нормативных значений,

а уровень показателя pH изменялся в пределах 2,4 до 3,1, что создает условия для выщелачивания и, соответственно, подвижности химических веществ из техногенного месторождения.

Содержащиеся в породном отвале соединения серы вместе с кислоторастворимыми соединениями тяжелых металлов при взаимодействии с атмосферными осадками смываются с поверхности техногенного массива на природный ландшафт, загрязняя почвы и ближайшие водные объекты. Результаты исследования воды из расположенных в зоне влияния отвала озер представлены на рис. 2.

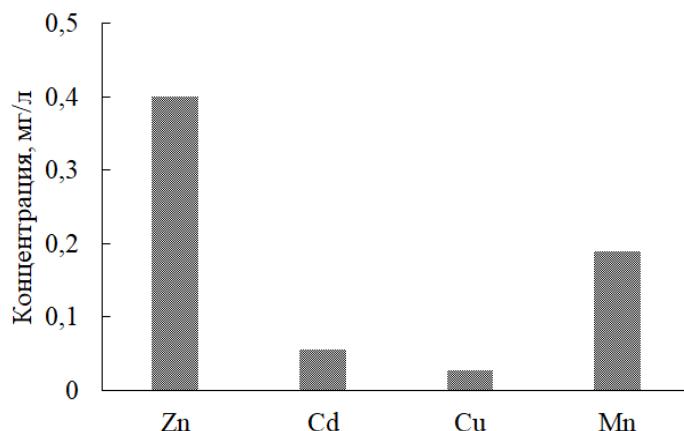


Рис. 2. Содержание тяжелых металлов в озерах, находящихся в зоне влияния Нелидовского породного отвала

Результаты натурных наблюдений показывают, что водорастворимые соединения химических веществ, инфильтруясь через тело техногенного месторождения в водоносные горизонты, способствуют формированию вертикальной миграции фильтрата породной массы в грунт его основания.

Вертикальная миграция вещества в глубь техногенного массива через почвогрунтовую толщу описывается одномерным уравнением конвективной диффузии, которое в случае нисходящего вертикального потока имеет вид [16]:

$$n_e \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial z} - \gamma C; \quad (1)$$

начальные условия уравнения (1):

$$t = 0: C(z, 0) = C_0(z);$$

граничные условия уравнения (1):

$$t > 0 \begin{cases} z = 0: [C(0, t) - C_e]v = D \frac{\partial C(0, t)}{\partial z}, \\ z = L: C(L, t) = C_{e\omega}, \text{ или } \frac{\partial C(L, t)}{\partial z} = 0, \end{cases}$$

где C_e , $C_{e\omega}$, C_0 – соответственно концентрация вещества в фильтрате, в грунтовых водах и начальная (фоновая) концентрация; n_e – эффективная пористость грунта;

D – коэффициент конвективной диффузии; v – скорость фильтрации; γ – коэффициент скорости трансформации вещества; t – время; z – сечение пласта; L – протяженность почвогрунтовой толщи.

Согласно результатам вычислительного эксперимента по прогнозу распространения веществ в глубину породной массы, миграция токсикантов с поверхности техногенного массива приводит к загрязнению грунта и подстилающих пород, что создает экологическую опасность для прилегающих к отвалу территорий.

Форма рельефа местности и ориентация склонов техногенного образования Нелидовских шахт позволяет на основании данных космической съемки определить направления поверхностных водных потоков, формирующихся под влиянием атмосферных осадков (рис. 3).

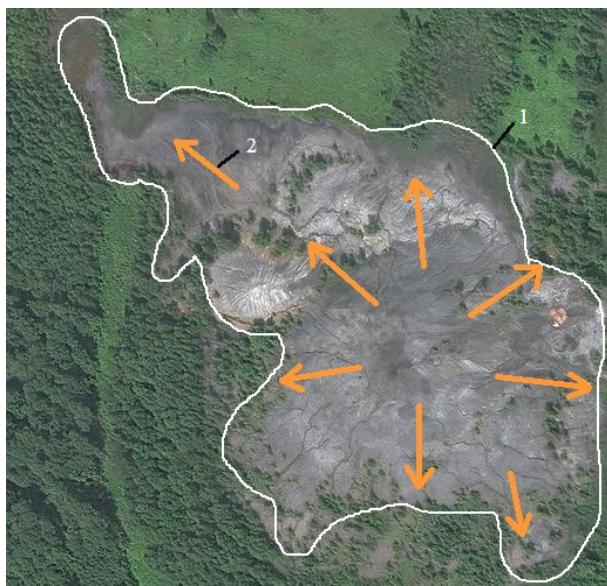


Рис. 3. Фрагмент спутниковой карты породного отвала Нелидовского буроугольного месторождения [17]: 1 – контур породного отвала; 2 – направления движения поверхностных водных потоков вместе с углепородной смесью

Анализ спутниковых карт позволил выявить отсутствие проведения комплекса горно-планировочных и горно-рекультивационных работ по формированию архитектуры породного отвала и снижению его негативного воздействия на прилегающие территории. В результате под влиянием природных и антропогенных факторов происходит перемещение углепородной смеси на ландшафт, что сокращает площадь наземной растительной экосистемы.

Исследование спутниковых снимков и натурные наблюдения позволили выявить деформацию поверхности отвала, возникшую в результате воздействия ветровой и водной эрозии, способствующих выдуванию, размыву, смыву пород и формированию просадок, осыпей, трещин (рис. 4). Рассмотренные процессы приводят к физическим потерям техногенного сырья и снижению потребительских свойств его компонентов.

Для сохранения ресурсного потенциала породного отвала Нелидовского месторождения, предотвращения его контакта с агрессивными факторами окружающей среды и снижения негативного воздействия техногенного образования на прилегающие территории предлагается применить технологию консервации.



Рис. 4. Поверхность склона породного отвала Нелидовского месторождения [18]

На основе разработанных отечественными специалистами технических решений [2, 7, 19] по консервации техногенных месторождений предложено провести работы в несколько этапов. На начальном этапе необходимо выполнить планировочные работы, включающие выравнивание поверхности и откосов породного отвала, устранение сорной растительности, уборку мусора.

Для разуплотнения «лежальных» породных отходов рекомендуется проводить рыхление верхней толщи грунта поверхности техногенного образования на глубину до 1 м.

На втором этапе формируется система изоляции техногенного месторождения от воздействия агрессивных природных факторов (рис. 5).

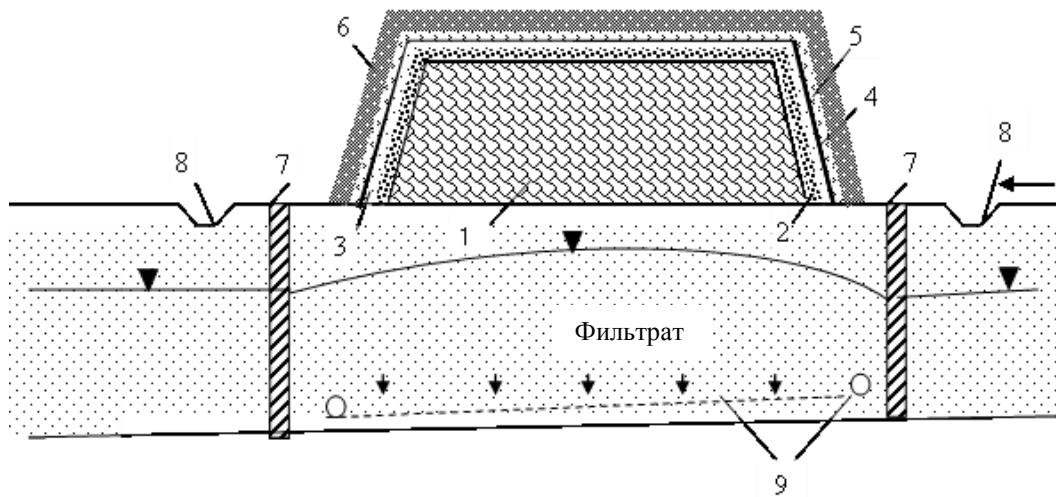


Рис. 5. Конструкция консервации породного отвала:

- 1 – тело породного отвала;
- 2 – слой мелиоративного торфяного сорбента;
- 3 – газодренажный слой;
- 4 – гидроизоляционный слой;
- 5 – водно-дренажный слой;
- 6 – защитный слой грунта;
- 7 – противофильтрационная завеса;
- 8 – контурный водоотводный канал;
- 9 – дренажные трубы

После рыхления предлагается нанести на углепородную смесь слой мелиоративного сорбента на основе торфа, который позволит задержать в породной толще водорастворимые соединения тяжелых металлов и уменьшить их вынос из отвала [19, 20]. Поверх сорбционного слоя формируется газовый дренаж из щебня или гальки для пассивного отвода газов из тела техногенного массива. Следующим укладывается гидроизоляционный слой, выполненный из геотекстильных материалов, для защиты газодренажного слоя от механических повреждений. Для отвода атмосферных осадков сверху наносится дренажный слой [2]. На вершине техногенного массива укладывается защитный слой грунта или торфа.

На заключительном этапе проводится комплекс мероприятий по защите грунтовых вод от негативного воздействия фильтрата, сформированного в теле породного отвала. Для аккумулирования вертикальных водных потоков в районе расположения породного отвала предлагается применить противофильтрационное устройство в виде кольцевой завесы. В результате поток загрязненных грунтовых вод будет собираться внутри контура завесы и перехватываться с помощью труб кольцевого дренажа при прохождении через водоносный слой. Противофильтрационная завеса представляет собой траншею, в которой размещают материал с низкими фильтрационными свойствами (например, глины). Поверхностный сток собирают с помощью кольцевого сборного канала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные на техногенном месторождении исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Проведена оценка состояния Нелидовского техногенного месторождения для обоснования применения технологии консервации породного отвала в целях его комплексного освоения.

2. Анализ породной массы на содержание тяжелых металлов и уровень pH позволил выявить процессы выщелачивания исследуемых химических веществ вместе с атмосферными водами и их смыв с поверхности техногенного массива на природный ландшафт, что приводит к загрязнению почв и ближайших водных объектов.

3. Водорастворимые соединения химических веществ, инфильтруясь через тело техногенного месторождения в водоносные горизонты, способствуют формированию вертикальной миграции фильтрата породной массы в грунт его основания.

4. Путем анализа спутниковых снимков и натурных наблюдений выявлена деформация поверхности отвала, которая явилась результатом воздействия ветровой, водной эрозии, способствующих выдуванию, размыву, смыву пород и формированию просадок, осипей, трещин.

5. Для сохранения ресурсного потенциала породного отвала Нелидовского месторождения, предотвращения его контакта с агрессивными факторами окружающей среды и снижения его негативного воздействия на прилегающие территории предложено применить технологию консервации техногенного образования, которая включает планировочные работы, мероприятия по формированию системы изоляции породного отвала и комплекс технических решений по защите природного ландшафта от негативного влияния вертикальной миграции токсичных соединений породной массы.

Таким образом, применение технологии консервации породного отвала обеспечит эффективную изоляцию техногенного сырья от влияния негативных природных явлений, способствующих протеканию химических и физико-механических реакций, и исключит дальнейшие потери ценных компонентов складируемой породы,

тем самым способствуя сохранению их ресурсного потенциала и экологической безопасности прилегающих природных ландшафтов.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Вайсман Я.И., Гайдай М.Ф. Разработка технологии консервации терриконников и сохранения ресурсного потенциала в целях снижения их негативного воздействия на окружающую среду // *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2016. Т. 15. № 19. С. 175–184.
3. 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*. 2008. № 4. С. 247–256.
4. Крупская Л.Т., Зверева В.П., Склярова 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 (научно-технический журнал)*. 2021. № 2. С. 5–21.
5. Пашкевич М.А., Паршина М.В. Разработка искусственного геохимического барьера в зоне воздействия техногенных массивов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009. № 6. С. 275–283.
6. Тюленева Т.А. Совершенствование технологии ликвидации провалов над горными выработками // *Техника и технология горного дела*. 2021. № 1 (12). С. 4–26.
7. Басова И.А., Прохоров Д.О., Пьянков С.В. Предложения по охране земель от негативного воздействия техногенных минеральных образований // *Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий*. 2021. № 5. С. 135–144.
8. Каплунов Д.Р., Качурин Н.М., Фридлендер Г.В., Ганин М.П. Комплексное освоение угольных и техногенных месторождений Подмосковного угольного бассейна // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2019. № 4. С. 113–123.
9. Трубецкой К.Н., Каплунов Д.Р., Викторов С.Д., Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Научное обоснование технологий комплексного ресурсоохраняющего освоения месторождений стратегического минерального сырья // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2014. № 12. С. 5–12.
10. Геологическое описание Нелидово-Селижаровского угленосного района. URL: <https://industrial-wood.ru/geologiya-mestorozhdeniy-uglyam/15669-geologicheskoe-opisanie-nelidovo-selizharovskogo-uglenosnogo-rayona.html> (дата обращения: 10.04.2025).
11. Кирюшина Е.В., Зеньков И.В., Конде А.С., Юронен Ю.П., Вокин В.Н., Миронова Ж.В., Сизова Т.Н. Исследование экологических последствий после закрытия угольных шахт в Смоленской и Калужской областях по данным спутниковой съемки // *Уголь*. 2025. № 2. С. 125–129.
12. Лобачева Л.В. Обоснование технологии комплексного освоения техногенных месторождений бурого угля // *Вестник Тверского государственного университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 1 (25). С. 39–47.

13. 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.
14. ГОСТ Р 55660-2013. Топливо твердое минеральное. Определение выхода летучих веществ. М.: Стандартинформ, 2019. 14 с.
15. ПНД Ф 12.1:2:2.2:2.3.2-03. Отбор проб почв, грунтов, осадков биологически очистных сооружений, шламов промышленных сточных вод, донных отложений искусственно созданных водоемов, прудов-накопителей и гидротехнических сооружений. М.: ФБУ «ФЦАО», 2014. 14 с.
16. Косов В.И., Шульгин Д.Ф., Клыков В.Е., Иванов В.Н. Математическое моделирование природных экосистем: учебное пособие / под ред. В.И. Косова. Тверь: ТГТУ, 1998. 255 с.
17. Тверская область. Террикон пос. Нелидово. URL: https://yandex.ru/maps/10816/nelidovo/geo/posyolok_shakhty_11/1499082772/?l=sat&ll=32.789385%2C56.248200&source=serp_navig&z=17 (дата обращения: 23.04.2025).
18. Тверская область. Шахты пос. Нелидово. URL: <https://yandex.ru/images/search?from=tabbar&lr=14&p=1&text=нелидовские%20шахты> (дата обращения: 24.04.2025).
19. Лебзин М.С. Обоснование технологии консервации породных отвалов сорбент-ориентированным способом: дис. канд. тех. наук. Екатеринбург, 2025. 159 с.
20. Тимофеев А.Е., Мисников О.С. Методы модификации формованных сорбционных материалов на основе торфа // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 5. С. 112–120.

Для цитирования: Лобачева Л.В. Обоснование технологии консервации породных отвалов бурого угля с целью комплексного освоения и сохранения ресурсного потенциала недр // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 4 (28). С. 29–37.

JUSTIFICATION OF TECHNOLOGY OF CONSERVATION OF BROWN COAL WASTE DUMPS FOR PURPOSE OF COMPREHENSIVE DEVELOPMENT AND PRESERVATION OF RESOURCE POTENTIAL OF SUBSOIL

L.V. LOBACHEVA, Cand. Sc.

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

The main approaches for the development of technologies for the conservation of technogenic brown coal mining deposits are considered, the technological principles of conservation of technogenic deposits are substantiated. The results of a study of technogenic raw materials for the content of heavy metals and the level of acidity are presented. An assessment of geochemical changes and damage to the Earth's surface in the zone of influence of the waste array is given. A technology of rock dump conservation is proposed for the integrated development and conservation of the resource potential of the subsurface.

Keywords: brown coal, hydrocarbon raw materials, rock dump, man-made deposit, conservation, integrated development of deposits, resource potential, sorbents.

Поступила в редакцию/received: 15.05.2025; после рецензирования/revised: 02.06.2025;
принята/accepted: 17.06.2025