

Способы восстановления земель, нарушенных при размещении буровых шламов: обзор существующих подходов

© 2025. А. А. Перевощикова^{1,2}, аспирант, м. н. с.,
Р. Д. Перевощиков², вед. инженер, А. А. Сурков¹, к. т. н., доцент,
Л. В. Рудакова¹, д. т. н., профессор,

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29,

²Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614068, Россия, г. Пермь, ул. Генкеля, д. 4,
e-mail: aaperevoshchikova@yandex.ru

В обзоре рассмотрена проблема размещения буровых шламов на дневной поверхности и их воздействия на окружающую среду. Отдельное внимание уделено негативному воздействию буровых шламов на почвенный покров и способам восстановления нарушенных земель. В состав бурового шлама в основном входят нефть и нефтепродукты (до 7%), минеральные соли (до 16,8%), соединения тяжёлых металлов (до 6%). Потенциальное загрязняющее действие на окружающую среду обусловлено малоопасными свойствами компонентов бурового раствора. Однако наибольшее воздействие на окружающую среду могут оказывать содержащиеся в буровом шламе ионы водорастворимых солей (хлориды, сульфаты, натрий), меньше – нефтепродукты и тяжёлые металлы. Загрязнение буровыми шламами приводит к нарушению экологического равновесия в почвенном биоценозе, угнетению растительности и трансформации ландшафтов. В целом проблема восстановления земель, нарушенных при размещении буровых шламов, является наиболее актуальной для территорий Западной Сибири. Обсуждаются различные подходы к восстановлению земель: внесение минеральной добавки, выравнивание слоёв и посев семян многолетних культур, производство техногенного грунта с последующим посевом культур-фитомелиорантов, использование гуминоминерального мелиоранта, использование сорбентов и геотуб, применение биологических методов. Недостатками описанных подходов является экономическая неэффективность и транспортная недоступность при поставке некоторых материалов и ресурсов. Однако создание искусственных почвогрунтов с применением биологических методов в комплексе с агротехническими приёмами способствует запуску почвообразовательных процессов, что позволит снизить техногенную нагрузку на окружающую среду и восстановить нарушенные земли и экосистемы с минимальными капитальными затратами. Тем самым, буровой шлам может являться минеральной почвообразующей породой для развития «молодых» почв и формирования устойчивых фитоценозов, поскольку содержит необходимые для растений микроэлементы, и в основе является алюмосиликатным материалом, на котором формируется большинство природных почв.

Ключевые слова: добыча нефти, буровой шлам, нарушенные территории, рекультивация, почвообразование.

Methods of restoring lands disturbed by drill cuttings disposal: current approaches review

© 2025. А. А. Perevoshchikova^{1,2} ORCID: 0000-0003-1769-7740,
R. D. Perevoshchikov² ORCID: 0000-0001-6451-8202,
A. A. Surkov¹ ORCID: 0000-0001-7756-2683,
L. V. Rudakova¹ ORCID: 0000-0003-3292-8359

¹Perm National Research Polytechnic University,
29, Komsomolskiy Ave., Perm, Russia, 614990,

²Perm State National Research University,
4, Genkel St., Perm, Russia, 614068,
e-mail: aaperevoshchikova@yandex.ru

This review explores the issue of surface placement of drill cuttings waste (DC) and its environmental consequences. Special focus is given to the DC detrimental effects on soils and methods for disturbed lands restoring. The DC contains oil and oil products (up to 7%), mineral salts (up to 16.8%), and heavy metal compounds (up to 6%). The risk of environmental pollution arises from the low-hazard nature of the DC components. However, the water-soluble

salts ions (chlorides, sulfates, sodium) can greatly affect the environment, while petroleum products and heavy metals have less effect. DC pollution leads to disturbance of the ecological balance in the soil biocenosis, vegetation depression and landscape transformation. The challenge of restoring lands affected by DC disposal is the most urgent for Western Siberia. Therefore, this review examines various approaches to such lands restoration. The methods involve the mineral additives as well as humic-mineral ameliorants applying, leveling layers and sowing perennial crop seeds, the production of man-made soil followed by the phytomeliorant plants sowing, sorbents and geotubes application, as well as biological methods implementation. The drawbacks of the above mentioned approaches include economic inefficiency and transport inaccessibility in the supply of certain materials and resources. However, the creation of artificial soils through biological methods in conjunction with mineral fertilizers and sandy soil facilitates the initiation of soil-forming processes, ultimately alleviating the anthropogenic burden on the environment and restoring disturbed lands and ecosystems with minimal financial cost. Thus, DC can be a mineral soil-forming rock for the development of “young” soils and the formation of stable phytocenoses, since it contains trace elements necessary for plants, and is based on an aluminosilicate material on which most natural soils are formed.

Keywords: oil production, drill cuttings, disturbed lands, reclamation, soil formation.

С ростом промышленного производства увеличивается потребление минеральных ресурсов, что приводит к увеличению объёмов образующихся отходов и возникновению экологических проблем. Углеводороды занимают ведущую позицию в мировом энергетическом секторе среди других источников энергии [1]. Ископаемые виды топлива, такие как нефть и природный газ, остаются основными составляющими энергопотребления. Нефть занимает лидирующие позиции на мировом рынке топлива, её добывают в 80 странах мира [2]. По данным статистических обзоров мировой энергетики, составляемых ежегодно компанией British Petroleum, в 2023 г. мировая добыча нефти достигла рекордного уровня – около 96 млн баррелей в сутки [3]. Лидерами по добычи нефти в 2023 г. стали США – 827,1 млн т, Россия – 544,7 млн т и Саудовская Аравия – 531,7 млн т [3].

На территории Российской Федерации выделяется несколько крупных нефтедобывающих районов: Западная и Восточная Сибирь, Поволжье и Северный Кавказ [4]. Предприятия нефтегазового комплекса в процессе добычи сырья образуют многотоннажные отходы при бурении и обслуживании скважин [4–7]. Например, на территории Западной Сибири, где добывается около 40% нефти в России, ежегодно образуется более 100 тыс. т буровых отходов [4].

Исследования показывают, что при разработке сланцевой нефти в США каждая горизонтальная скважина образует около 113 млн т бурового шлама (БШ) [8]. Данные Американского нефтяного института свидетельствуют о том, что на каждый фут бурения приходится в среднем 1,2 барреля отходов [9].

Буровые отходы состоят из сточных, пластовых вод, тампонажных, буровых растворов и БШ [4]. В среднем отходы бурения состоят из 50% твёрдого вещества и 50% жидкости

[9]. Буровые шламы представляют собой измельчённые горные породы, которые выносятся на поверхность буровыми растворами. По данным исследований, ежегодно в мире образуется около 1,5–2,5 млн т буровых отходов [10], при этом в России этот показатель достигает 300–500 тыс. т [4].

В России основные объёмы отходов нефтегазодобычи концентрируются в четырёх ключевых регионах, таких как Ханты-Мансийский автономный округ-Югра (ХМАО-Югра) – 4,728 млн т, Ямало-Ненецкий автономный округ (ЯНАО) – 1,16 млн т, Республика Татарстан – 0,728 млн т и Республика Башкортостан – 0,322 млн т [6].

Исторически сложилось так, что БШ утилизировали наиболее доступными и экономически выгодными способами, что привело к размещению большого количества отходов в резервных накопителях [11]. В настоящее время БШ размещают на поверхности в шламовые амбары. В ХМАО-Югре, например, находится 2700 шламовых амбаров [6]. Несмотря на существующие в настоящее время разработки по использованию БШ в строительной отрасли (например, в производстве стройматериалов или дорожных покрытий), спрос на этот вторичный продукт остаётся низким. Как показывают исследования [12–14], только 15–20% образующихся БШ подвергаются переработке, что связано с рядом факторов: удалённость месторождений (в среднем 500–1000 км от перерабатывающих центров, что увеличивает логистические расходы); технологические ограничения – нестабильный состав БШ; экономические факторы – себестоимость переработки в 2–3 раза превышает стоимость захоронения [15], отсутствие развитой инфраструктуры в регионах добычи.

Учитывая миллионы тонн уже накопленных и вновь образующихся БШ, техногенная нагрузка на окружающую среду (ОС) остаётся

высокой [16]. Это связано с тем, что БШ состоят как из относительно безопасных, так и из токсичных компонентов; последние являются опасными для ОС и здоровья человека [17]. Длительное накопление БШ на поверхности приводит к структурной и химической деградации почвенного покрова, включая уменьшение мощности гумусного слоя, ухудшение агрофизических свойств и угнетение почвенной микробиоты. Тем самым, большое количество факторов, ограничивающих использование БШ, и высокий уровень техногенной нагрузки на ОС заставляют искать дополнительные эколого-экономические решения по утилизации БШ, в том числе, их вовлечения в биологический круговорот в качестве почвообразующей породы.

Таким образом, цель работы – систематизация информации о подходах к восстановлению земель, нарушенных при размещении БШ, и обоснование возможности интеграции шламов в природные экосистемы.

Объекты и методы исследования

При проведении систематического обзора были использованы различные электронные библиографические базы данных elibrary.ru, CyberLeninka, поисковые системы по научным публикациям Академия Google, ScienceDirect, MDPI, Springer Nature Link. Поиск патентов проводили через сервис Google patents, Яндекс патенты. Для систематизации информации использовали литературные источники без ограничений по времени и типу публикации. В настоящем обзоре источники отбирались по ключевым словам «добыча нефти», «буровые отходы», «шламовые амбары», «техногенное почвообразование», «техногенное засоление», «нефтесолевая нагрузка на окружающую среду», «drilling fluid waste», «utilization drilling fluids», «waste management».

Образование, состав и свойства буровых шламов

Буровые шламы содержат те же химические вещества, что и горные породы, и буровые растворы [16, 17], и представляют собой сложную многокомпонентную смесь, включающую: твёрдую фазу – частицы горных пород, глинистые минералы (монтмориллонит, каолинит, иллит), барит (BaSO_4), остатки полимерных добавок; органические компоненты – углеводороды, остатки буро-

вых растворов на нефтяной основе; тяжёлые металлы (Pb, Cd, Hg, Cr, Ni, Zn), источником которых являются как горные породы, так и химические реагенты; водорастворимые ионы (Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+}), мигрирующие из пластовых вод и буровых растворов. Состав БШ значительно варьирует в зависимости от геологии месторождения, технологии бурения и типа бурового раствора [12, 13, 18]. Однако, в среднем в состав БШ входят нефть и нефтепродукты (до 7%), минеральные соли (до 16,8%), соединения тяжёлых металлов (до 6%) [5]. Кроме того, вместе с БШ происходит вынос на поверхность естественных радионуклидов [19].

Свойства БШ определяются их составом, происхождением и технологией бурения. Их можно разделить на физические, химические и технологические, которые определяют как их потенциальную полезность, так и экологическую опасность. Физические свойства включают гранулометрический состав с преобладанием частиц 0,1–100 мкм [17], влажность 15–40% и плотность 1,8–2,5 г/см³, обусловленную минеральными компонентами. Химические свойства характеризуются наличием полезных компонентов (минеральная основа SiO_2 , Al_2O_3 , CaCO_3 , элементы питания растений Ca, Mg, K, P), высокой буферной ёмкостью и значениями pH 7–9 [18], а также присутствием опасных загрязнителей, включая нефтепродукты (1–25%), тяжёлые металлы (до 500 мг/кг Pb, Cd, Hg [17, 18, 20]) и соли (3–15 г/кг). Технологические свойства, такие как низкая фильтрационная способность (10^{-5} – 10^{-7} см/с) и термическая устойчивость (разложение при 150–300 °C), влияют на методы переработки. Экологические свойства обуславливают как риски (токсичность, миграция загрязнений, долговременное воздействие), так и потенциальные возможности использования шламов после детоксикации [18].

Однако стоит учитывать тот факт, что свойства БШ определяются многими факторами внешней среды и способны изменяться с течением времени [5], поскольку шламовые амбары расположены на дневной поверхности [21] (рис. 1).

Таким образом, БШ на 60–85% состоят из алюмосиликатов (монтмориллонит, каолинит, иллит) – минералов, являющихся компонентами плодородных природных почв [22]. Буровые шламы содержат макроэлементы питания растений Ca – 1,2–4,5%, Mg – 0,3–1,8%, микроэлементы (Fe, Zn, Cu) в биодоступных



Рис. 1. Опытно-промышленный участок шламового амбара в Ханты-Мансийском автономном округ-Югре, октябрь 2024 года
Fig. 1. Experimental and industrial site of a waste pit in the Khanty-Mansi Autonomous Okrug- Yugra, October 2024

формах [23]. Кроме того, данные рентгено-флуоресцентного анализа показали, что в 92% проб БШ содержание тяжёлых металлов не превышало ПДК при $\text{pH} > 6,5$ [24].

Экологическое воздействие буровых шламов

На территории России крупнейшие месторождения углеводородного сырья находятся в Западной и Восточной Сибири, а также Тимано-Печорском нефтяном регионе. Наибольшие объёмы нефтедобычи приходятся на территорию ХМАО-Югра [25] и на территорию ЯНАО [26], т. е. на уязвимые лесоболотные ландшафты.

Согласно государственному реестру объектов размещения отходов (ГРОО) [27], с 2014 по 2024 гг. на территории ХМАО-Югра было зарегистрировано 855 объектов размещения буровых отходов (шламовые амбары, шламонакопители), на территории ЯНАО – 197. На рисунке 2 представлены населённые пункты, в которых зарегистрировано наибольшее количество объектов размещения буровых отходов в период 2014–2024 гг. в ХМАО-Югре и в ЯНАО соответственно.

Согласно мнению некоторых исследователей, шламовые амбары оказывают техногенное влияние на все компоненты ОС: атмосферу, гидросферу, почвенный покров, флору и фауну, геологическую среду [28–32]. Загрязнение атмосферного воздуха происходит за счёт испарения лёгких фракций нефтепродуктов с поверхности шламового амбара [33]. Воздействие на подземные и поверхностные воды связано с качеством и надёжностью технического обустройства шламового амбара: изоляция может нарушиться вследствие повреждения гидроизоляционного слоя дна или обваловки, а также при повышении уровня грунтовых вод [33].

Отходы бурения оказывают наибольшее воздействие на почвенный и растительный покров. Загрязняющие вещества, попадая в почву, изменяют её структуру, минеральный состав, физико-химические свойства, ухудшают агрохимические показатели и значительно подавляют активность биоты [34, 35].

При оценке пригодности БШ для дальнейшей утилизации, вторичного использования, размещения или захоронения определяющую роль играет присутствие в их составе нефтяных углеводородов, токсичных компонентов и тяжёлых металлов [36]. Главная особенность БШ – очень высокая концентрация солей в рассолах (минерализация растворов достигает 70–100 г/л) [37, 38]. Хранение БШ на поверхности способствует развитию процессов техногенного засоления (техногенный галогенез) поверхностных и подземных вод, почв и грунтов [38].

Помимо углеводородного загрязнения и засоления, БШ также оказывают негативное влияние на почвенный покров при механическом воздействии: происходит уплотнение, снижение пористости и ухудшение аэрации почв вследствие высокой плотности (1,8–2,5 г/см³) и тонкодисперсного состава шламов [12, 17, 18]. При подщелачивании почв (pH 8–10) за счёт карбонатов (CaCO_3) и гидроксидов снижается доступность микроэлементов (Fe, Mn, Zn) для растений [20].

Подходы к восстановлению земель, нарушенных при размещении буровых шламов

Утилизация БШ зачастую является ресурсоёмким, трудоёмким и экономически неэффективным процессом, особенно в регионах с недостаточно развитой транспортной инфраструктурой и суровыми природно-

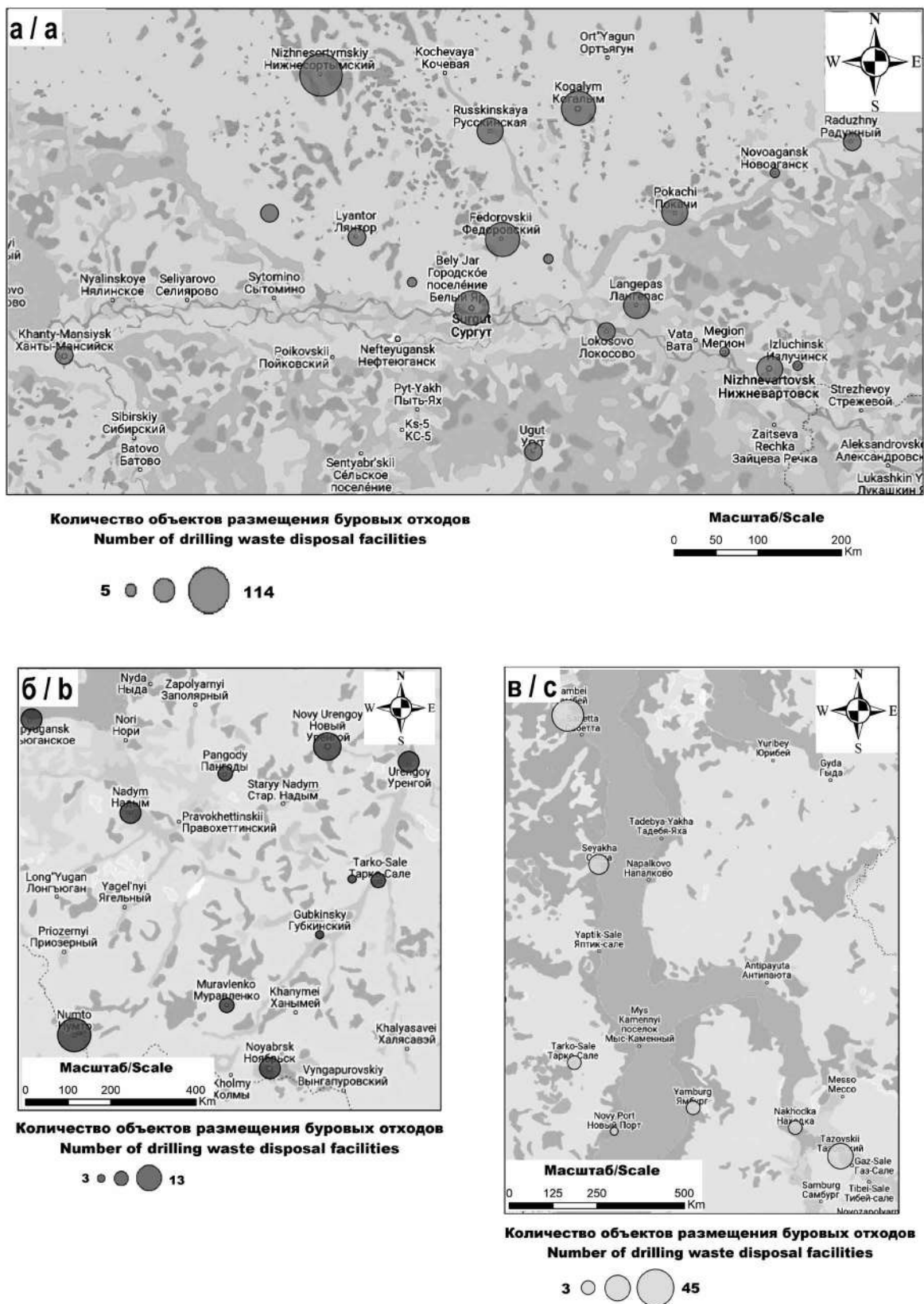


Рис. 2. Места размещения буровых отходов в 2014–2024 гг. на территории Ханты-Мансийского автономного округа-Югра (а) и Ямало-Ненецкого автономного округа (б, в) [27]
Fig. 2. Drilling waste disposal sites in Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug-Yugra (a) and Yamalo-Nenets Autonomous Okrug (b, c) from 2014 to 2024 [27]

климатическими условиями [39]. В связи с этим, обычная и экономичная практика утилизации БШ – захоронение в амбарах и на промышленных полигонах [10].

Буровые шламы имеют V класс опасности (неопасные вещества) и содержат необходимые для растений макро- и микроэлементы, поэтому они могут применяться в качестве добавки для улучшения физических свойств почв. Например, в работе [40] сделан вывод о том, что добавка 15% БШ повышает влагоудерживающую способность песчаных почв на 40%.

Смешивание БШ с торфом (1:3) снижает подвижность нефтепродуктов [41].

Для восстановления нефтезагрязнённых почв широко используются различные препараты. Например, в работе [42] рассмотрено действие гуминового препарата. Поставлен модельный эксперимент по ремедиации почвы, искусственно загрязнённой нефтью в количестве 5%. Гуминовый препарат применяли в трёх дозировках: как стимулятор аборигенной микрофлоры (300 л/га), как удобрение (3000 л/га), как сорбент (30000 л/га). Было установлено, что гуминовый препарат наиболее эффективен в качестве стимулятора аборигенной микрофлоры, максимум которой наблюдался спустя месяц после внесения препарата, а степень деструкции нефти за два месяца эксперимента составила 40,1%.

На законодательном уровне наиболее распространённым способом восстановления нарушенных земель при размещении БШ является рекультивация. Правовой основой рекультивации служат требования федеральных законов «Об охране окружающей среды», «Об экологической экспертизе» и «О недрах», также земельного и лесного кодексов РФ, ГОСТ 59057-2020, ГОСТ Р 57447-2017, ГОСТ Р 59070-2020 и других нормативно-правовых актов, действующих на территории России.

Однако исследования по поиску наиболее экологичного и экономичного способа восстановления нарушенных территорий при размещении БШ продолжаются. В работе [43] предложен способ рекультивации земель, занятых шламовыми амбарами, путём внесения минеральной добавки, выравнивания слоёв и посева семян многолетних культур. В качестве добавки используют углеродный сорбент-деструктор, фосфогипс, строительный песок или песчано-глинистую фракцию.

Для восстановления земель, подверженных воздействию БШ, рассматривается применение биологических методов, которые способствуют не только восстановлению и очи-

щению почвы, но и обеспечивают экологическую безопасность и экономическую выгоду. Например, использование биопрепаратов, содержащих активные штаммы микроорганизмов: бактерий и грибов [33]. В частности, разработанные биопрепараты на основе штаммов *Rhodococcus ruber* и *Pseudomonas fluorescens* обеспечивают деградацию 85–90% нефтепродуктов за 2 сезона [44]. Наибольшую эффективность демонстрируют представители родов *Pseudomonas*, *Rhodococcus*, *Acinetobacter* и *Bacillus*, способные разлагать алифатические и ароматические углеводороды [45–47]. Рассматривается и комбинированное применение микробных консорциумов с фитомелиорацией (использование *Medicago sativa*, *Festuca arundinacea*), что усиливает детоксикацию за счёт ризосферных эффектов [48]. Однако успешность биоремедиации существенно зависит от гранулометрического состава почв, климатических условий и исходного уровня загрязнения теми или иными веществами, что требует индивидуального подхода к каждому участку.

Помимо биологических методов, рассматриваются и технические способы утилизации шлама с получением готового техногрунта. Предложен способ утилизации БШ, заключающийся в производстве техногенного грунта путём смешивания БШ и песка. Буровые шламы модифицируют путём добавления фосфогипса, глауконитового сорбента и песка с последующей механической гомогенизацией для получения стабилизированного техногенного грунта. Далее проводят рекультивацию методом фитомелиорации с применением гуминового препарата «Росток» [49]. Разработан способ утилизации БШ, заключающийся в том, что в БШ вносят торф, известь и минеральные удобрения [50]. Все материалы смешивают до получения сыпучей массы, которая складывается в бурты и укрывается полимерной плёнкой. Далее вносят измельчённую известь и при необходимости комплексные минеральные удобрения, после чего участок перекапывают и засевают травами или проводят посадку деревьев.

Предложен способ восстановления земель, который включает устройство секционного шламового амбара с двойным обвалованием, гидроизоляцию стенок и дна, размещение отходов бурения, откачку жидкой фазы с последующим высаживанием растений в шламонакопитель без засыпки [51].

Аналогичный подход к восстановлению земель рассмотрен в работе [52], который

включает откачку жидкой фазы, перемешивание отработанного бурового отхода с торфом.

Один из подходов к восстановлению земель, нарушенных при размещении БШ, заключается в использовании грунтошламовых смесей, изготовленных на специальной площадке путём перемешивания БШ, песка и торфа. Подготовленную смесь выдерживают, а затем перемещают к месту использования. Компоненты смеси выгружают на площадку с формированием валов или слоёв, которые затем перемешивают экскаватором или фрезой [53].

В процессе ремедиации земель, нарушенных в результате горнодобывающей деятельности и при разработке нефтегазовых месторождений, широкое применение находят сорбенты. Сорбенты вносят в почву или используют для создания искусственных покрытий на поверхности шламовых амбаров. Они помогают снизить концентрацию загрязняющих веществ и предотвратить их распространение в ОС [54, 55].

Также предлагаются способы восстановления земель с использованием геотуб. Такой метод применяется на предприятиях по добыче калийных солей и производству калийных удобрений. Геотубы представляют собой объёмные полимерные мешки, заполненные смесью из шлама, торфа и песка. Мешки укладывают на загрязнённой территории, где они подвергаются воздействию влаги и микроорганизмов, которые способствуют разложению и нейтрализации загрязняющих веществ [56].

Наиболее актуальным является метод фиторемедиации, демонстрирующий высокую эффективность в отношении почв, загрязнённых тяжёлыми металлами. Как показано в работе [57], технология также перспективна для ремедиации нефтезагрязнённых территорий, благодаря комплексному детоксицирующему действию системы «растение-микроорганизмы» [57, 58].

Описанные подходы к восстановлению земель, нарушенных при размещении БШ, в основном заключаются в изготовлении грунтошламовых смесей на оборудованной площадке путём перемешивания БШ, различных минеральных добавок, песка и торфа. Некоторые способы рекультивации предусматривают использование минеральных препаратов и мелиорантов с последующим посевом трав и посадкой деревьев, а также использование микроорганизмов. Преимуществами этих способов восстановления земель являются: экологическая безопасность, так как используются

натуральные материалы, которые не оказывают токсического действия на ОС; сохранение биоразнообразия, поскольку посадка деревьев и трав, использование микроорганизмов способствуют восстановлению экосистем и повышению устойчивости ландшафтов. Однако недостатками описанных способов является экономическая неэффективность, потому что в большинстве методов предусмотрено применение торфа, что вызывает трудности из-за удалённости нефтегазодобывающих регионов и проблем с транспортировкой материалов. Кроме того, дополнительные сложности могут создавать природно-климатические условия – болотистая местность и многолетняя мерзлота.

Интеграция биологических методов ремедиации с традиционными агротехническими приёмами (внесение минеральных удобрений и песчаного субстрата) при конструировании искусственных почвогрунтов стимулирует развитие почвообразовательных процессов и формирование техногенных поверхностных образований. Такой комплексный подход позволяет достичь экологической реабилитации нарушенных территорий при минимальных капитальных и эксплуатационных затратах.

Несмотря на экологическую опасность БШ, актуальными являются вопросы по оценке возможности восстановления земель, нарушенных при размещении БШ, и интеграции шламовых амбаров в природные экосистемы, поскольку БШ имеют в своём составе не только токсичные элементы, но также макро- и микроэлементы, необходимые для роста и развития растений. Тем самым, они могут являться минеральной почвообразующей породой для развития «молодых» почв и формирования устойчивых фитоценозов при использовании биологических методов в комплексе с агротехническими приёмами: внесение минеральных удобрений и потенциально-плодородного грунта.

Заключение

По мере сохранения спроса на углеводороды увеличивается объём образования БШ, что создаёт растущую техногенную нагрузку на ОС. Буровые шламы характеризуются низким уровнем токсичности компонентов бурового раствора, как правило, имеющими IV–V класс опасности. Однако наибольшее воздействие на ОС могут оказывать содержащиеся в БШ водорастворимые соли, нефтепродукты и тяжёлые металлы.

Техногенному воздействию подвергаются все компоненты окружающей природной среды, но наибольшее воздействие испытывает почвенный и растительный покров. Загрязнение БШ приводит к нарушению экологического равновесия в почвенном биоценозе. Загрязнители, попадая в почву, изменяют её структуру, минеральный состав, физические и химические свойства, снижают плодородие и значительно подавляют активность биоты.

Наиболее распространённым способом восстановления нарушенных земель при размещении БШ является рекультивация с применением мелиорантов, сорбентов с дальнейшим посевом трав. Также существуют подходы к восстановлению земель путём создания грунтошламовых смесей, использование геотубов и применение биологических методов (биоаугментация). С позиции устойчивого развития и экономической целесообразности оптимальным является метод фиторемедиации с использованием однодольных растений (овсяницы луговой и тростниковой, тимopheевики луговой, мятлика лугового и других видов), основанный на механизмах фитоэкстракции и фитостабилизации, а также интеграция шламовых амбаров в природные экосистемы. Поскольку БШ представлены породами алюмосиликатного состава, не содержат опасных веществ, содержат ряд необходимых макро- и микроэлементов, они могут быть субстратом для роста и развития растений.

Таким образом, применение существующих подходов к рекультивации нарушенных земель при размещении БШ открывает перспективы в управлении многотоннажными отходами с учётом таких факторов как удалённость территории, логистика и природно-климатические условия. Восстановление ландшафтов и проведение экологической реабилитации промышленных зон является актуальным вопросом в области применения природоподобных технологий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, проект FSNF-2025-0011.

References

1. Lebedev A., Cherepovitsyn A. Waste management during the production drilling stage in the oil and gas sector: a feasibility study // *Resources*. 2024. V. 13. No. 2. Article No. 26. doi: 10.3390/resources13020026
2. Nikonov A.N., Potapova S.O. The oil industry is one of the major environmental pollutants // *Pozharnaya bezopasnost: problemy i perspektivy*. 2018. No. 9. P. 667–672 (in Russian).
3. British Petroleum [Internet resource] <https://www.energyinst.org/statistical-review#regional-overview> (Accessed: 18.02.2025).
4. Gaevaya E.V., Tarasova S.S., Rudakova L.V. Environmental assessment of drill cuttings and development of a technique for their bioremediation. Tyumen: GAU Severnogo Zauralya, 2024. 96 p. (in Russian).
5. Vlasov A.S., Pugin K.G., Tyuryukhanov K.Y., Rudakova L.V., Glushankova I.S., Surkov A.A. Development of a method for producing geoeologically safe road building materials based on drill cuttings // *Ecology and Industry of Russia*. 2020. V. 24. No. 11. P. 19–23 (in Russian). doi:10.18412/1816-0395-2020-11-19-23
6. Bulatov V.I., Igenbaeva N.O., Nanishvili O.A. Oil and gas complex waste products as technological indicator of geoeological condition of Russia regions // *Bulletin of Science and Practice*. 2021. V. 7. No. 8. P. 46–55 (in Russian). doi: 10.33619/2414-2948/69/05
7. Gaurina-Medimurec N., Pašić B., Mijić P., Medved I. Deep underground injection of waste from drilling activities – an overview // *Minerals*. 2020. V. 10. No 4. Article No. 303. doi: 10.3390/min10040303
8. Stuckman M.Y., Lopano C.L., Berry S.M., Hakala J.A. Geochemical solid characterization of drill cuttings, core and drilling mud from Marcellus Shale Energy development // *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 2019. V. 68. Article No. 102922. doi: 10.1016/j.jngse.2019.102922
9. Keller P.R. Evaluating drivers of liability, risk, and cost while enhancing sustainability for drilling waste // *AADE National Technical Conference and Exhibition*. Houston, Texas, 2017 [Internet resource] https://www.aade.org/application/files/8115/7132/1750/AADE-17-NTCE-085_-_Keller.pdf (Accessed: 18.02.2025).
10. Ball A.S., Stewart R.J., Schliephake K. A review of the current options for the treatment and safe disposal of drill cuttings // *Waste Manag. Res.* 2012. V. 30. No. 5. P. 457–473. doi: 10.1177/0734242X11419892
11. McKay M., Seward M.W., Smith G., Brady S.J. Minimizing drilling fluid waste discharges while drilling an Arctic exploratory well // *SPE Western Regional Meeting*. Long Beach: OnePetro, 1991. Article No. SPE-21765-MS. doi: 10.2118/21765-MS
12. Kazamias G., Zorpas A. Drill cuttings waste management from oil and gas exploitation industries through end-of-waste criteria in the framework of circular economy strategy // *J. Clean. Prod.* 2021. V. 322. Article No. 129098. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129098
13. Ayotamuno J.M., Okparanma R.N., Araka P.P. Bioaugmentation and composting of oil-field drill-cuttings containing polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) // *J. Food Agric. Environ.* 2009. V. 7. No. 2. P. 658–664.
14. Liu X., He L., Zhang X., Kong D., Chen Z., Lin J., Wang C. Bioremediation of petroleum-contaminated saline soil by *Acinetobacter baumannii* and *Talaromyces* sp. and

functional potential analysis using metagenomic sequencing // *Environ. Pollut.* 2022. V. 311. Article No. 119970. doi: 10.1016/j.envpol.2022.119970

15. Orazbayev B., Santeyeva S., Zhumadillayeva A., Dyussekeyev K., Agarwal R.K., Yue X.-G., Fan J. Sustainable waste management drilling process in fuzzy environment // *Sustainability*. 2019. V. 11. Article No. 6995. doi: 10.3390/su11246995

16. Seyedmohammadi J. The effects of drilling fluids and environment protection from pollutants using some models // *Model. Earth Syst. Environ.* 2017. V. 3. Article No. 23. doi: 10.1007/s40808-017-0299-7

17. Costa L.C., Carvalho C.F., Soares A.S.F., Souza A.C.P., Bastos E.F.T., Guimarães E.C.B.T., Santos J.C., Carvalho T., Calderari V.H., Marinho L.S., Marques M.R.C. Physical and chemical characterization of drill cuttings: a review // *Mar. Pollut. Bull.* 2023. V. 194. Pt. A. Article No. 115342. doi: 10.1016/j.marpolbul.2023.115342

18. Yang J., Sun J., Wang R., Qu Y. Treatment of drilling fluid waste during oil and gas drilling: a review // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2023. V. 30. No. 8. P. 19662–19682. doi: 10.1007/s11356-022-25114-x

19. Gaevaya E.V., Tarasova S.S. Assessment of the radiation hazard of drilling mud and the possibility of their use for reclamation of disturbed lands // *The Eurasian Scientific Journal*. 2023. V. 15. No. 2. Article No. 42NZVN223 (in Russian).

20. Vu K.A., Mulligan C.N. Remediation of oil-contaminated soil using Fe/Cu nanoparticles and biosurfactants // *Environ. Technol.* 2023 V. 44. No. 22. P. 3446–3458. doi: 10.1080/09593330.2022.2061381

21. Morozov A.E., Belov L.A., Zalesov S.V., Osipenko R.A. The effectiveness of sludge pits recultivation by planting willow cuttings in the northern taiga subzone // *Advances in current natural sciences*. 2021. No. 2. P. 19–25 (in Russian).

22. Miao X., Li H., Bao R., Feng C., Wu H., Zhan H., Li Y., Zhao K. Discriminating the Mineralogical composition in drill cuttings based on absorption spectra in the terahertz range // *Appl. Spectrosc.* 2017. V. 71. No. 2. P. 186–193. doi: 10.1177/0003702816653129

23. Jacoby R., Peukert M., Succurro A., Koprivova A., Kopriva S. The role of soil microorganisms in plant mineral nutrition – current knowledge and future directions // *Front. Plant Sci.* 2017. V. 8. Article No. 1617. doi: 10.3389/fpls.2017.01617

24. U.S. Environmental Protection Agency. Technical Report 12-457: Characterization of drilling waste materials. 2021. 89 p. [Internet resource] <https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-03/documents/characterization-drilling-waste-materials.pdf> (Accessed: 15.07.2025).

25. Oil and Gas 2025 [Internet resource] https://www.neftegaz-expo.ru/ru/ui/17158/?utm_source=google.com&utm_medium=organic&utm_campaign=google.com&utm_referrer=google.com (Accessed: 18.02.2025) (in Russian).

26. Filimonova I.V., Provornaya I.V., Komarova A.V., Zemnukhova E.A. Sustainable trends in changing the regional framework of oil production in Russia // *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*. 2019. V. 14. No. 3. Article No. 33 (in Russian). doi: 10.17353/2070-5379/33_2019

27. State Register of Waste Disposal Facilities [Internet resource] <https://www.airsoft-bit.ru/spravochnik/546-groro> (Accessed: 02.18.2025) (in Russian).

28. Dolgikh I.L., Bachurin B.A. On the nature of organic pollution of natural geosystems during oil and gas well construction // *Vestnik PGUTU. Neft' i gaz*. 2000. V. 2. No. 3. P. 86–90 (in Russian).

29. Klimova A.A., Mishunina A.S., Azarova S.V., Fominykh D.E., Yazikov E.G. Determining the toxicity of drilling muds using the methods of biotesting, case study of Tomsk region the territory // *Oil Industry Journal*. 2018. No. 4. P. 108–111 (in Russian). doi: 10.24887/0028-2448-2018-4-108-111

30. Moskovchenko D.V., Dorozhukova S.L. The consequences of drilling operations in the North of the Tyumen region // *Ecology and Industry of Russia*. 2002. No. 9. P. 27–30 (in Russian).

31. Pashkevich M.A., Gvozdetskaya M.V. Development of methodology for monitoring the environmental hazards of drilling waste // *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2013. No. 7. P. 314–317 (in Russian).

32. Avdeeva I.I., Nekhorosheva A.V., Kirzhakov I.F., Akhmedzhanov R.R. Environmental hazard assessment for drilling slime pits in the open environment of Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra // *XXI Century. Technosphere Safety*. 2016. V. 1. No. 4. P. 39–47 (in Russian).

33. Pichugin E. Drilling mud as a component of reclamation materials // *Ecology and industry of Russia*. 2018. V. 22. No. 4. P. 16–19 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2018-4-16-19

34. Melekhina E.N., Kanev V.A., Markarova M.Yu., Nadezhkin S.M., Nowakowsky A.B., Taskaeva A.A., Tarabukin D.V., Velegzhaninov I.O., Rasova E.E. Assessment of the state of oil-polluted ecosystems of European Subarctic: a multidisciplinary approach // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 2. P. 123–129 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-2-123-129

35. Ilnitskiy V.G., Selukov A.E., Zakharov V.V., Syrchina N.V. Organization of ecological monitoring in the oil-fields on the territory of Komi Republic // *Theoretical and Applied Ecology*. 2007. No. 1. P. 28–36 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2007-1-028-36

36. Vasilyev A.V., Tupitsina O.V. Ecological impact of drilling sludges and approaches to its treatment // *Izvestia of RAS SamSC*. 2014. V. 16. No. 5. P. 308–313 (in Russian).

37. Vodyanitsky Yu.N., Ladonin D.V., Savichev A.T. Soil contamination with heavy metals. Moskva: Tipografiya Rosselkhozakademii, 2012. 304 p. (in Russian).

38. Solntseva N.P. Oil production and geochemistry of natural landscapes. Moskva: Izdatelstvo MGU, 1998. 376 p. (in Russian).
39. Cherepovitsyn A., Lebedev A. Drill cuttings disposal efficiency in offshore oil drilling // J. Mar. Sci. Eng. 2023. V. 11. No. 2. Article No. 317. doi: 10.3390/jmse11020317
40. Xiong D., Wang C. Risk assessment of human exposure to heavy metals, polycyclic aromatic hydrocarbons, and radionuclides in oil-based drilling cutting residues used for roadbed materials in Chongqing, China // Environ. Sci. Pollut. Res. 2021. V. 28. P. 48171–48183. doi: 10.1007/s11356-021-13871-0
41. Imam A., Suman S. K., Ghosh D., Kanaujia P. K. Analytical approaches used in monitoring the bioremediation of hydrocarbons in petroleum-contaminated soil and sludge // TrAC Trends Anal. Chem. 2019. V. 118. P. 50–64. doi: 10.1016/j.trac.2019.05.023
42. Fomicheva N.V., Smirnova Yu.D., Rabinovich G.Y. Influence of new humic preparation on remediation of oil-contaminated soil // Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2022. V. 12. No. 2. P. 310–320 (in Russian). doi: 10.21285/2227-2925-2022-12-2-310-320
43. GilaeV.G., Strunkin S.I., Jashkov V.A., Kozlov S.A., Nechaev A.S., Ismagilov A.F., Timashev E.O., Kuleshov S.P., Dokichev V.A., Alimbekov R.I., Bakhtizin R.N., Grekov S.N., Latypova D.R. Method of recultivation of lands occupied with sludge sump // Patent RU 2564839 C1. Application: 2014111363/13, 25.03.2014. Date of publication: 10.10.2015. Bull. 28 (in Russian).
44. Varjani S.J. Microbial degradation of petroleum hydrocarbons // Bioresour. Technol. 2017. V. 223. P. 277–286. doi: 10.1016/j.biortech.2016.10.037
45. Kuyukina M.S., Ivshina I.B. Bioremediation of contaminated environments using *Rhodococcus* // Biology of *Rhodococcus*. Microbiology Monographs. V. 16. / Ed. H. Alvares. Cham: Springer, 2019. doi: 10.1007/978-3-030-11461-9_9
46. Sozina I.D., Danilov A.S. Microbiological remediation of oil-contaminated soils // Journal of Mining Institute. 2023. V. 260. P. 297–312. doi: 10.31897/PMI.2023.8
47. Soleimani M., Afyuni M., Hajabbasi M.A., Nourbakhsh F., Sabzalian M.R., Christensen J.H. Phytoremediation of an aged petroleum contaminated soil using endophyte infected and non-infected grasses // Chemosphere. 2010 V. 81. No. 9. P. 1084–1090. doi: 10.1016/j.chemosphere.2010.09.034
48. Nazarov A.M., Tuktarova I.O., Davletshin T.K., Chetverikov S.P. Processing and research of effectiveness of new biopreparates based on *Rhodococcus* sp. H33, gumates and lignosulfonates for the cleaning of neftezainously contaminated soils // Petroleum Engineering. 2023. V. 21. No. 6. P. 310–321 (in Russian). doi: 10.17122/ngdelo-2023-6-310-321
49. Gaevaya E.V., Skipin L.N., Bogajchuk Ya.E., Tarasova S.S., Mitrikovskij A.Ya., Zakharova E.V., Postovalov R.Yu. Method for disposing drilling mud when producing man-made soil // Patent RU 2631681 C1. Application: 2017108080, 10.03.2017. Date of publication: 26.09.2017. Bull. 27 (in Russian).
50. Melnikov I.I., Neyenburg E.V., Chulkov N.P., Letechin A.A. Method for processing water-based drilling mud and sludge formed during drilling // Patent RU 2005107571 A. Application: 2005107571/03, 18.03.2005. Date of publication: 27.08.2006. Bull. 24 (in Russian).
51. Sedykh V.N., Malyshkina L.A., Danilenko L.A. Method for the reclamation of sludge pits without backfilling within the forest fund area of the Russian Federation in the middle taiga subzone of Western Siberia // Patent RU 2015123483 A. Application: 2015123483, 17.06.2015. Date of publication: 10.01.2017. Bull. 01 (in Russian).
52. Mazhayskij Yu.A., Pershina S.S., Pavlov A.A., Samoshina A.A., Khvostova E.N., Artyukhov I.P., Filatov Yu.A., Stenina O.E., Golubenko M.I. Method for recultivation of sludge barn in conditions of Extreme North // Patent RU 2688653 C1. Application: 2018139773, 09.11.2018. Date of publication: 21.05.2019. Bull. 15 (in Russian).
53. Gabasov T.Kh. Reclamation of lands occupied by slime pits caused by oil-and-gas production // Patent RU 2492943 C1. Application: 2012123636/13, 08.06.2012. Date of publication: 20.09.2013. Bull. 26 (in Russian).
54. Petrova T.A., Rudzish E. Utilization of sewage sludge as an ameliorant for reclamation of technogenically disturbed lands // Journal of Mining Institute. 2021. V. 251. P. 767–776 (in Russian). doi: 10.31897/PMI.2021.5.16
55. Skipin L.N., Galyamov A.A., Gayeva E.V., Zakharova E.V. The sludge depot technogenic impact on the environment of the Yamal Peninsula // Bulletin of KrasGAU. 2014. No. 11. P. 146–150 (in Russian).
56. Borzakovskii B.A., Rusakov M., Shilov A.V. Prospects for application of geotubes for disposal of clay-salt sludge in potash plants // Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2016. No. 1. P. 207–216 (in Russian).
57. Kireyeva N.A., Grigoriadi A.S., Bagautdinov F.Ya. Phytoremediation as a way to purifying soils contaminated with heavy metals // Theoretical and Applied Ecology. 2011. No. 3. P. 4–10 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2011-3-004-010
58. Shulaev N.S., Kadyrov R.R., Pryanichnikova V.V. Combined method of phytoremediation and electrical treatment for cleaning contaminated areas of the oil complex // Journal of Mining Institute. 2024. V. 265. P. 147–155 (in Russian).