



Обзорная статья

УДК 504.06:622.24

EDN: IQTKWY

DOI: 10.21285/2686-9993-2026-49-3-3

Методы обезвреживания отработанных растворов и буровых шламов

О.И. Матиенко^{a✉}, В.В. Четверикова^b, Е.Г. Филатова^c

^{a-c}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация

Резюме. Целью проведенного исследования являлось рассмотрение актуальной проблемы обезвреживания отходов бурения – буровых отработанных растворов и бурового шлама, а также анализ недостатков традиционного метода захоронения в шламонакопителях, заключающихся в низкой экологической надежности и нерациональном использовании земельных ресурсов. В ходе работы проведен обзор и сравнительный анализ современных методов обезвреживания: физико-химической нейтрализации, разделения фаз, термической обработки, отмывки и отверждения. На основе сопоставления технологических, экологических и экономических критериев обосновано, что метод отверждения минеральными и быстротвердеющими вяжущими является наиболее предпочтительным. Особое внимание уделено составам на основе портландцемента, фосфогипса и магнезиального цемента, применение которых в дозировке от 40 % позволяет формировать прочную водонерастворимую матрицу, практически полностью исключающую миграцию нефтепродуктов и тяжелых металлов в окружающую среду. В статье также рассмотрены современные тренды развития технологий – комбинирование механического обезвреживания, химической модификации и биологической ремедиации, что дает синергетический эффект и снижает удельные затраты. Проанализирована перспектива получения техногенных грунтов из переработанных шламов, пригодных для строительной отсыпки и рекультивации нарушенных земель. Отмечено, что отвержденные массы позволяют вести засыпку амбаров и планировку территории с использованием стандартной строительной техники, что упрощает внедрение технологии.

Ключевые слова: буровой отработанный раствор, буровой шлам, обезвреживание отходов, отверждение, рекультивация, шламохранилище, экологическая безопасность

Для цитирования: Матиенко О.И., Четверикова В.В., Филатова Е.Г. Методы обезвреживания отработанных растворов и буровых шламов // Науки о Земле и недропользование. 2026. Т. 49. № ?. С. ?–?. DOI: 10.21285/2686-9993-2026-49-3-3. EDN: IQTKWY.

Review article

Methods for treating spent drilling muds and drill cuttings

Olga I. Matienko^{a✉}, Valentina V. Chetverikova^b, Elena G. Filatova^c

^{a-c}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. The purpose of the study is to examine the pressing issue of drilling waste treatment – namely, spent drilling muds and drilling cuttings – as well as to analyze the shortcomings of the traditional disposal method in sludge storage ponds, which include low environmental reliability and inefficient use of land resources. The study involves a review and comparative analysis of modern treatment methods: physicochemical neutralization, phase separation, thermal treatment, washing, and curing. Based on the comparison of technological, environmental, and economic criteria, it is substantiated that the curing method using mineral and fast-setting binders is the most preferable. Special attention is paid to formulations based on Portland cement, phosphogypsum, and magnesia cement, the use of which at a dosage of 40% or more makes it possible to form a durable, water-insoluble matrix that almost completely prevents the migration of petroleum products and heavy metals into the environment. The article also examines current trends in technological development, including the combination of mechanical dewatering, chemical modification, and biological remediation, which provides a synergistic effect and reduces specific costs. The potential for producing man-made soils from recycled cuttings, suitable for construction backfill and reclamation of disturbed lands, is analyzed. It is noted that cured soils allow backfilling of pits and site grading using standard construction equipment, which simplifies the implementation of the technology.

Keywords: spent drilling mud, drill cuttings, waste treatment, curing, land reclamation, sludge storage pit, environmental safety

For citation: Matienko O.I., Chetverikova V.V., Filatova E.G. Methods for treating spent drilling muds and drill cuttings. *Earth sciences and subsoil use*. 2026;49(?):?-?. (In Russ.). DOI: 10.21285/2686-9993-2026-49-3-3. EDN: IQTKWY.

© Матиенко О.И., Четверикова В.В., Филатова Е.Г., 2026



Введение

В практике бурения нефтяных и газовых скважин наиболее распространенным методом ликвидации отходов бурения остается их захоронение в шламонакопителях (шламовых амбарах) непосредственно на территории нефтедобычи. Все шламовые амбары должны быть лицензированы и внесены в соответствующий Государственный реестр объектов размещения отходов согласно Федеральному закону от 4 мая 2011 г. № 99-ФЗ «О лицензировании отдельных видов деятельности»¹, в котором ужесточили требования к размещению отходов бурения. Кроме того, сооружения облагаются налогами. В проектной документации на строительство скважин должны быть предусмотрены мероприятия по накоплению и обращению с отходами и мероприятия по снижению их воздействия на окружающую среду.

Согласно этим мероприятиям предусмотрено, что большая часть видов отходов подвергается обезвреживанию, использованию и размещению на специализированных объектах. Так, отходы бурения (буровой шлам) могут размещаться в шламонакопителе с отвержде-

нием при рекультивационных работах либо периодически транспортироваться для обезвреживания с переработкой в строительный материал специализированной организацией. Металлсодержащие виды отходов передаются спецпредприятию для транспортировки на переработку и повторное использование. Данный подход не обеспечивает надежной экологической защиты мест размещения отходов (рис. 1).

Ситуация усугубляется необходимостью длительного ожидания подсыхания содержимого амбаров перед их засыпкой и рекультивацией, что приводит к нерациональному использованию земельных ресурсов и изъятию их из хозяйственного оборота на продолжительный срок [1]. Несмотря на безвозвратные потери бурового раствора и экологические риски, метод захоронения остается наиболее доступным. Однако применение современных технологий обезвреживания позволяет повысить экологичность буровых работ, обеспечить благоприятные условия для своевременной рекультивации и исключить стадию длительного ожидания затвердевания отходов.



Рис. 1. Участок шламонакопителя
Fig. 1. Sludge pond area

¹ О лицензировании отдельных видов деятельности: федер. закон № 99-ФЗ от 04.05.2011 // Rpn.gov.ru. Режим доступа: https://rpn.gov.ru/upload/iblock/e6c/vosgd5oqfhqcl4vl63vdkcx9apvtjpk/Federalnyy-zakon-ot-04.05.2011-N-99_FZ-_red.-ot-23.05.2025_.pdf (дата обращения: 16.03.2026).



Мировые объемы накопления отходов бурения достигли критических значений. По оценкам исследователей, при бурении одной скважины образуется до 200–500 м³ бурового шлама, а глобальное накопление нефтешламов превышает 1 млрд т [2]. В Российской Федерации только в Западной Сибири ежегодно образуется более 600 тыс. т отходов бурения, при этом значительная часть размещается в шламонакопителях без надлежащей изоляции [3]. В связи с этим актуальной проблемой является обезвреживание буровых отходов.

Материалы и методы исследования

Цель проведенной работы заключалась в анализе современных научно-технических литературных данных и обосновании выбора наиболее эффективных и экологически безопасных методов обезвреживания буровых отработанных растворов и буровых шламов. В ходе исследования использован метод сравнительного анализа, осуществлено сопоставление отечественного и зарубежного опыта по обезвреживанию отходов бурения. Авторами проанализированы 30 литературных источников (монографии, обзорные и экспериментальные статьи). Большинство из них опубликовано в 2020–2026 гг., а пик приходится на 2023–2026 гг., что подчеркивает актуальность темы и активный поиск оптимальных решений в данной области.

Обсуждение полученных результатов

Известно, что перспективными методами обезвреживания буровых отходов являются: физико-химическая нейтрализация и разделение фаз; специфические методы обезвреживания бурового шлама (окисление и гидрофобизация); метод отверждения как приоритетное направление обезвреживания.

Физико-химическая нейтрализация и разделение фаз. Одним из приоритетных направлений в области обращения с отходами бурения является физико-химическая нейтрализация содержимого шламонакопителей. Данный подход предусматривает разделение буровых отработанных растворов на жидкую и твердую фазы с последующей утилизацией жидкой части и нейтрализацией осадка.

Для разделения фаз используются флокулирующие добавки, которые вызывают коагуляцию жидкой фазы и осаждение твердых частиц (рис. 2).



Рис. 2. Коагуляция жидкой фазы буровых отработанных растворов
Fig. 2. Coagulation of the liquid phase of spent drilling muds

Современные исследования в этой области демонстрируют высокую эффективность применения катионных полимерных флокулянтов. Ц. Бу с соавторами синтезировал катионный полимерный флокулянт на основе лаурилметакрилата и метакрилоилоксиэтилтриметиламмоний хлорида, который при дозировке 1 % обеспечивает снижение плотности отработанного бурового раствора на 0,54 г/см³ и уменьшение содержания твердой фазы на 15 %. Процесс разделения фаз осуществляется в две стадии: после первичного отстаивания осветленную воду удаляют, а оставшуюся массу повторно обрабатывают флокулянтom до максимального отделения воды [4].

Для интенсификации процесса разделения применяется механическое обезвоживание. Отделившаяся вода после очистки может быть направлена для технических нужд бурения или приготовления нового бурового раствора. Выделение воды осуществляется с помощью декантирующих центрифуг, а оставшаяся часть буровых отработанных растворов направляется на фильтр-пресс для дальнейшего обезвоживания. Полученный шлам с остаточной влажностью до 30 % характеризуется пониженной токсичностью.

Исследования А. Захрана и др. [5] демонстрируют эффективность замкнутого цикла переработки буровых растворов с применением интегрированных систем механического разделения и химического рекондиционирования. Внедрение такой системы позволило снизить затраты на буровой раствор на 50 % за счет его рециклинга и существенно сократить выбросы углекислого газа, связанные с транспортировкой и производством новых объемов раствора.



Заслуживает внимания способ ликвидации шламовых амбаров методом расслоения буровых отработанных растворов с последующим отверждением верхней части осадка. Технология включает следующие этапы: введение коагулянта (из расчета 1,5 кг на 1 м³ жидкой фазы) при активном перемешивании цементировочным агрегатом в течение 1,5–2 ч; отстаивание в течение 1 суток; откачка осветленной воды для технологических нужд; откачка подвижной части загущенного осадка, смешение с вяжущим (цементом из расчета 0,8 т на 1 м³) и возврат смеси в амбар; отверждение поверхностного слоя в течение 2 суток; нанесение глиняного экрана (0,3 м) и засыпка минеральным грунтом.

Е.И. Компасенко и соавторы [6] предложили усовершенствованную систему управления отходами бурения при строительстве скважин на суше, включающую многоступенчатую обработку с применением коагулянтов и флокулянтов с последующим обезвреживанием на центрифугах. Данная технология позволяет снизить класс опасности отходов до IV–V и использовать обезвреженный материал для рекультивации.

Окисление и гидрофобизация. Сравнительный анализ методов окисления органических загрязнителей и гидрофобизации поверхности шлама показывает, что метод окисления обладает значительно меньшей эффективностью. Это ограничивает его применение в практике обезвреживания буровых шламов.

Более перспективным признается метод гидрофобизации поверхности с использованием органических или растворимых высокомолекулярных соединений с последующим воздействием электролитов. Механизм действия основан на высаливании полимера, в результате чего частицы породы покрываются защитной пленкой, препятствующей растворению в воде токсичных компонентов.

Наибольшую эффективность среди исследованных полимеров показал сополимер малеинового ангидрида с акриламидом, обеспечивающий высокую степень гидрофобизации и необходимую глубину обезвреживания. Данный метод был рекомендован для морского бурения, так как эффект гидрофобизации усиливается при контакте с морской средой.

Термическая обработка. Среди безреагентных методов обезвреживания твердых отходов бурения термический метод заслуживает особого внимания. Термическая обработка обеспечивает деструкцию органических веществ всех основных классов, присутствующих в буровом шламе, включая нефть и нефтепродукты.

А.Е. Зимнухова и Е.В. Гаевая [7] исследовали влияние железосодержащих порошков на физико-механические свойства бурового шлама при термическом обезвреживании. Установлены закономерности изменения водопоглощающей способности и прочности при сжатии в зависимости от массовой доли внесения добавок, что позволяет получать экологически безопасные материалы с заданными свойствами.

Согласно информационно-техническому справочнику по наилучшим доступным технологиям ИТС 9-2020², термические методы обезвреживания отходов (сжигание, пиролиз, плазменная обработка) относятся к наилучшим доступным технологиям при условии соблюдения нормативов выбросов и контроля режимов сжигания.

В.В. Маслов с соавторами [8] рассматривает геоэкологические риски при освоении углеводородного потенциала арктического шельфа, подчеркивая необходимость применения термических методов обезвреживания в условиях низких температур и ограниченной транспортной доступности.

Исследование аргентинских ученых под руководством А. Рейес-Уррутии [9] посвящено применению медленного пиролиза для переработки буровых шламов на нефтяной основе. При температурах 400–650 °С достигнуто снижение содержания нефтепродуктов с 12,5 % до значений менее 1 %, что соответствует критериям отнесения к неопасным отходам. Полученная жидкая органическая фракция может быть использована в качестве вторичного энергоресурса.

Практическая реализация термического метода осуществляется в печах специальной конструкции, например в барабанных электрических печах, позволяющих реализовать необходимые температурные режимы для глубокого обезвреживания шламов с высоким содержанием загрязнителей.

² ИТС 9-2020. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Утилизация и обезвреживание отходов термическими способами. М.: Бюро НДТ, 2020. 208 с.



Отмывка горячей водой. Эффективным и технологически доступным методом частичного обезвреживания бурового шлама является отмывка загрязняющих органических компонентов (нефти и нефтепродуктов) горячей технической водой в системе оборотного водоснабжения буровой.

Экспериментально установлено, что при содержании нефти более 5 % степень отмывки стабилизируется и составляет 70–75 %. Загрязненность сточных вод взвешенными веществами возрастает при увеличении содержания нефти до 5 %, а затем остается на постоянном уровне. Влажность шлама также влияет на эффективность процесса: увеличение степени отмывки наблюдается при влажности до 20 %, максимальные значения достигаются в интервале 15–20 %. При влажности более 20 % дальнейшего повышения эффективности не происходит.

Метод отверждения. Наиболее перспективным направлением обезвреживания буровых отработанных растворов и бурового шлама признается их отверждение. Обезвреживающий эффект достигается за счет превращения отходов в инертную консолидированную массу и связывания загрязняющих веществ в ее структуре, что практически исключает их миграцию в окружающую среду.

Отвержденная масса может быть захоронена в земляных амбарах непосредственно на территории буровой без нанесения ущерба окружающей среде. Введение активирующих добавок позволяет получать материал, способный выдерживать нагрузки от транспортной техники, что существенно упрощает процесс засыпки амбаров, последующую планировку и рекультивацию, а также сокращает сроки возврата земель землепользователям.

Современные исследования в области отверждения буровых отходов развиваются в направлении создания комбинированных технологий. Е.А. Мазлова и др. [10] исследовали комбинированный метод утилизации нефтесодержащих отходов с применением бактериального препарата и пероксида кальция в геоконтейнерной емкости. Эффективность снижения концентрации нефтепродуктов составила 60–70 %, что подтверждает перспективность сочетания химических и биологических методов.

Е.В. Гаевая и Л.В. Рудакова [11] разработали критерии обеспечения геоэкологической безопасности технологического процесса ути-

лизации буровых шламов, включающие оценку солевого состава, содержания тяжелых металлов и нефтепродуктов на всех этапах переработки.

В качестве отверждающих составов предлагаются различные композиции. Исследования эффективности минеральных вяжущих показали, что высокий обезвреживающий эффект обеспечивают: портландцемент, фосфогипс-полугидрат, магнезиальный цемент, смесь цемента с доломитовой мукой (состав «Роса»).

Данные составы позволяют эффективно обезвреживать отходы бурения в широком диапазоне загрязненности, превращая их в консолидированные массы с высокими прочностными характеристиками. Это создает условия для безопасного использования транспортной техники при засыпке амбаров и рекультивации.

Расход вяжущего и сроки твердения могут быть существенно сокращены при использовании активирующих добавок – высокомолекулярных соединений на основе полиизоцианатов. При этом формируется эластичноподобная консолидированная масса с низкими загрязняющими свойствами. Однако водоустойчивость полимерглинистых композиций ниже, чем композиций на основе минеральных вяжущих, а высокая стоимость и дефицитность полиизоцианатов ограничивают их применение.

Указанных недостатков лишены быстротвердеющие составы на основе силиката натрия и цемента с добавками активных минеральных материалов (цеолит, фильтроперлит, доломитовая мука). Процесс твердения протекает в две стадии: резкое загущение массы с началом отверждения; подсыхание и набор прочности.

В табл. 1 представлены результаты оценки технологических свойств отвержденных масс (прочность на сжатие, водоустойчивость, вымываемость загрязнителей). Приведенные данные свидетельствуют о практической ценности быстротвердеющих составов и целесообразности их внедрения.

Экспериментально подтверждено, что при введении отвердителя (портландцемента) в количестве не менее 40 % процесс твердения завершается за 7 суток. Полученная масса устойчива к водной выдержке и сохраняет прочностные свойства. Нефть и нефтепродукты полностью связываются в структуре и не



Таблица 1. Эффективность отверждающих составов [12]
Table 1. Efficiency of curing compounds [12]

Состав	Прочность на сжатие, кг/см ²	Вымываемость нефтепродуктов, %	Время твердения, сут.
Портландцемент (40 %)	38	0,1	7
Магнезиальный цемент	42	0,08	5
Состав «Роса»	35	0,12	7
Быстротвердеющий состав (силикат Na + цеолит)	40	0,09	2

вымываются даже при длительном (56 суток) хранении в водной среде.

Инновационные разработки и комплексные решения. Перспективным направлением является создание техногенных грунтов на основе буровых шламов.

От свойств бурового раствора, как и от его минерального состава, который варьирует в зависимости от осуществляемых видов работ при бурении и требуемых заданных свойств бурового раствора, зависит химический состав бурового шлама [13–17]. Элементарный состав бурового шлама, прошедший очистку по данным санитарно-эпидемиологических заключений, и состав тампонажного портландцемента приведены в табл. 2 [18].

Большинство буровых шламов состоит из глинистого минерала каолина и кварца, а также содержит примеси других минералов.

Ученые Пермского национального исследовательского политехнического университета и Тюменского индустриального университета разработали технологию переработки буровых шламов в техногенный грунт для рекультивации земель. Технология основана на смешивании шлама, полученного после грубой очистки в безамбарном цикле, с природными компонентами: для грунта строительного назначения требуется добавление 25 % песка, 10 % гипса или доломитовой муки и 10 % природного сорбента; для грунта сельскохозяйственного назначения – 40 % торфа,

10 % гипса и 10 % сорбента. Природные компоненты изменяют свойства шлама: гипс снижает концентрацию солей, сорбенты за 28–56 суток уменьшают содержание нефтепродуктов и связывают металлы, а торф способствует формированию активного микробного сообщества. Всхожесть семян в таком грунте достигает 90–96 % [12].

Годовые отчеты ПАО «Роснефть» свидетельствуют о внедрении на предприятиях компании технологий термической десорбции и рециклинга буровых растворов, что позволило существенно сократить объемы размещаемых отходов^{3,4}.

В работах А.Е. Зимнухой [19] и Е.В. Гаевой и др. [20–23], которые исследовали физико-механические свойства бурового шлама при высокотемпературном обезвреживании, установлен оптимальный температурный режим для получения экологически безопасной продукции.

Комбинированные технологии с применением геоконтейнеров и окислителей рассматриваются в работе Т.С. Смирновой и др. [24], где показана экономическая целесообразность применения таких методов в условиях Арктической зоны Российской Федерации.

В работе [25] ученые Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности рассматривают комплекс природоохранных мер, способствующих очистке, обезвреживанию и утилизации производ-

Таблица 2. Состав бурового шлама и тампонажного портландцемента
Table 2. Composition of drilling mud and grouting Portland cement

Материал	Содержание, %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O + K ₂ O	SO ₃
Портландцемент	21–24	4–8	2–4	63–66	0,5–5	0,4–1	0,3–1
Буровой шлам	47–53	17–23	7–9	5–6	2–3	5–6	3–4

³ Технологии лидерства: годовой отчет 2022 // Rosneft.ru. Режим доступа: https://www.rosneft.ru/upload/site1/document_file/a_report_2022.pdf (дата обращения: 16.03.2026).

⁴ Энергия инноваций: годовой отчет 2023 // Rosneft.ru. Режим доступа: https://www.rosneft.ru/upload/site1/document_file/a_report_2023.pdf (дата обращения: 16.03.2026).



ственно-технологических отходов бурения – буровых сточных вод, отработанных буровых растворов и выбуренной породы или бурового шлама, содержащих широкую гамму загрязнителей, представленных применяемыми в бурении материалами и химреагентами. Наиболее перспективным методом переработки отработанных буровых растворов и шлама авторы считают реагентную коагуляцию.

Авторы работ [26–28] приводят результаты исследований по методу утилизации отходов бурения путем получения капсулированных материалов на основе оксида кальция и нефтешлама в качестве гидрофобизатора, рекомендуемых к использованию при тампонировании обсадных колонн нефтяных и газовых скважин. Оптимальное соотношение компонентов составляет оксид кальция – 70–80 % масс., нефтешлам – 20–30 % масс.

Анализ зарубежного опыта⁵ [29, 30] доказывает эффективность применения мобильных установок термической десорбции. Американская нефтесервисная компания Халлибёртон представила результаты применения мобильной вертикальной центрифуги для сушки шлама (*англ.*: Mobile Vertical Cuttings Dryer, MVCD) в Омане, позволившей рекупировать 2242 барреля синтетического бурового раствора и сократить объем вывозимого шлама на 40 %, что обеспечило экономию около 373 тыс. долл. США.

Комплексные технологии переработки буровых отходов обеспечивают не только снижение экологических рисков, но и экономическую эффективность за счет сокращения платежей за размещение отходов, возврата земель в хозяйственный оборот и возможности вторичного использования материалов.

Заключение

Проведенный анализ методов обезвреживания буровых отработанных растворов и бурового шлама позволяет сделать следующие выводы:

1. Традиционный метод захоронения отходов в шламонакопителях не отвечает современным экологическим требованиям и должен быть замещен технологиями обезвреживания, обеспечивающими снижение токсичности и последующую рекультивацию земель.

2. Среди рассмотренных методов (физико-химическая нейтрализация, разделение фаз, термическая обработка, отмывка, отверждение) наиболее перспективным является метод отверждения. Данный метод позволяет связать токсичные компоненты в прочную водонерастворимую матрицу. Эффективность отверждения подтверждена многочисленными исследованиями как в России, так и за рубежом.

3. Использование для обработки буровых отходов минеральных вяжущих (портландцемент, фосфогипс, магнезиальный цемент) в дозировке не менее 40 % обеспечивают получение консолидированной массы с требуемыми прочностными характеристиками и полным отсутствием вымываемости нефтепродуктов.

4. Современные исследования направлены на разработку комбинированных технологий, сочетающих механическое обезвреживание, химическую обработку и биологическую ремедиацию, что позволяет достичь максимальной эффективности при минимальных затратах.

5. Перспективным направлением является создание техногенных грунтов на основе переработанных буровых шламов для использования в строительных целях и рекультивации нарушенных земель.

6. Применение отвержденных масс обеспечивает возможность качественной засыпки амбаров и успешного проведения рекультивации с использованием традиционной техники, что подтверждает экологическую и экономическую эффективность данного направления.

Таким образом, наиболее экологически и технически обоснованным направлением обезвреживания буровых отработанных растворов и буровых шламов является их отверждение минеральными и быстротвердеющими композициями, а перспектива развития отрасли связана с переходом к комбинированным технологиям и получением техногенных грунтов. Дальнейшие исследования целесообразно направить на оптимизацию составов отвердителей под конкретные типы буровых отходов и на оценку долгосрочной экологической безопасности отвержденных масс.

⁵ MVCD technology improves cuttings treatment and waste management in five-well trial // Halliburton.com. Режим доступа: <https://www.halliburton.com/en/resources/innovative-mvcd-technology-improves-cuttings-treatment-and-waste-management-in-five-well-trial> (дата обращения: 16.03.2026).



Список источников

1. Жуков Т.Н., Глушанкова И.С. Исследование процессов обезвреживания и утилизации отработанных буровых растворов // Экология и научно-технический прогресс. Урбанистика. 2015. Т. 1. С. 120–128. EDN: VUYZYP.
2. Bal A.S., Stewart R., Schliephake K. A review of the current options for the treatment and safe disposal of drill cuttings // Waste Management & Research. 2012. Vol. 30. Iss. 5. P. 457–473. DOI: 10.1177/0734242X11419892.
3. Гаевая Е.В. Геоэкологическое состояние почвенного покрова в зоне влияния шламового амбара на нефтяном месторождении // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2023. № 5. С. 42–48. DOI: 10.33285/2411-7013-2023-5(314)-42-48. EDN: UJHVRB.
4. Bu J., Zhang X., Yan H., Li B., Guo X., Han C., et al. Application of a cationic polymer flocculant for the treatment and recycling of spent oil-based drilling fluids // ACS Omega. 2026. Vol. 11. Iss. 11. P. 17511–17520. DOI: 10.1021/acsomega.5c11043.
5. Zahran A., Reyad M., Ibrahim A., Salim M., Atiah M., Gamal H. Sustainable drilling mud recycling: engineering solutions for waste minimization and cost optimization // Kuwait Oil & Gas Show (Kuwait, 3–5 February 2026). Kuwait, 2026. P. SPE-230969-MS. DOI: 10.2118/230969-MS.
6. Компасенко Е.И., Кадыров О.Р., Мазлова Е.А., Осташ О.С. Совершенствование системы управления отходами бурения при строительстве скважин на суше // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2023. № 1. С. 33–41. DOI: 10.33285/2411-7013-2023-1(310)-33-41. EDN: POOLKB.
7. Зимнухова А.Е., Гаевая Е.В. Влияние железосодержащих порошков на физико-механические свойства бурового шлама при получении экологически безопасных материалов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2025. № 4. С. 16–22. EDN: VIZLYY.
8. Маслов В.В., Телков В.П., Семянцева П.К. Геоэкологические риски при стратегическом планировании освоения углеводородного потенциала палеозойского комплекса отложений арктического шельфа России // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. 2024. № 2. С. 40–50. EDN: EVLSKW.
9. Reyes-Urrutia A., Fernandez A., Torres-Sciancalepore R., Zalazar-García D., Venier C., Rozas-Formandoy C., et al. Sustainable hazardous mitigation and resource recovery from oil-based drill cuttings through slow pyrolysis: a kinetic and product analysis // Sustainability. 2026. Vol. 18. Iss. 2. P. 969. DOI: 10.3390/su18020969.
10. Мазлова Е.А., Смирнова Т.С., Вишневский В.Д., Сидоренко М.С. Исследование комбинированного метода утилизации нефтесодержащих отходов на примере буровых шламов // Экология и промышленность России. 2026. Т. 30. № 1. С. 10–15. DOI: 10.18412/1816-0395-2026-1-10-15. EDN: MCSOGI.
11. Гаевая Е.В., Рудакова Л.В. Разработка критериев обеспечения геоэкологической безопасности технологического процесса утилизации буровых шламов // Экология промышленного производства. 2025. № 4. С. 2–10. DOI: 10.52190/2073-2589_2025_4_2. EDN: GZIIXA.
12. Шевченко А. Российские ученые разработали технологию утилизации буровых шламов. Но ее эффективность не очевидна // Neftegaz.RU. Режим доступа: <https://neftgaz.ru/news/standarts/914865-rossiyskie-uchenye-razrabotali-tehnologiyu-utilizatsii-burovykh-shlamov/> (дата обращения: 16.03.2026).
13. Пугин К.Г. Утилизация бурового шлама в технологическом процессе производства асфальтобетонной смеси // Экология и промышленность России. 2025. Т. 29. № 5. С. 34–39. DOI: 10.18412/1816-0395-2025-5-34-39. EDN: NSQAHN.
14. Власов А.С., Пугин К.Г., Тюрюханов К.Ю., Рудакова Л.В., Глушанкова И.С., Сурков А.А. Разработка способа получения геоэкологически безопасных дорожно-строительных материалов на основе бурового шлама // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 11. С. 19–23. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-11-19-23. EDN: JXAABU.
15. Перевощикова А.А., Перевощиков Р.Д., Сурков А.А., Рудакова Л.В. Способы восстановления земель, нарушенных при размещении буровых шламов: обзор существующих подходов // Теоретическая и прикладная экология. 2025. № 4. С. 18–27. DOI: 10.25750/1995-4301-2025-4-018-027. EDN: CRPJJI.
16. Тарасова С.С., Гаевая Е.В. Влияние содержания водорастворимых солей в буровых шламах на смертность гидробионтов (*Daphnia magna* Straus и *Chlorella vulgaris* Beijer) // Естественные и технические науки. 2021. № 7. С. 81–84. EDN: VKAIRW.
17. Бабкина В.А., Загорская А.А., Пимнева Л.А. Перспективы очистки жидкой фракции буровых отходов методом электрокоагуляции // Вестник молодого ученого УГНТУ. 2022. № S3. С. 39–43. EDN: UYUHAG.
18. Косач А.Ф., Мемякин К.А., Курбанова Р.Б., Педун Г.А. Применение буровых шламов в составе цемента-шламовых вяжущих при строительстве нефтяных и газовых скважин // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: сборник материалов VI Междунар. науч.-практ. конф. (г. Омск, 25–26 ноября 2021 г.). Омск: Изд-во СибАДИ, 2021. С. 395–398. EDN: GFWPWT.
19. Зимнухова А.Е., Гаевая Е.В. Исследование физико-механических свойств бурового шлама при его высокотемпературном обезвреживании // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2024. Т. 32. № 2. С. 155–162. DOI: 10.22363/2313-2310-2024-32-2-155-162. EDN: WQYTZY.
20. Гаевая Е.В. Комплексная геоэкологическая оценка буровых шламов и подходы к их утилизации // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2025. Т. 33. № 2. С. 219–230. DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-2-219-230. EDN: IGMWYJ.
21. Гаевая Е.В., Рудакова Л.В. Исследование закономерностей изменения солевого состава буровых шламов в процессе их утилизации // Теоретическая и прикладная экология. 2024. № 2. С. 125–134. DOI: 10.25750/1995-4301-2024-2-125-134. EDN: AKHBSG.



22. Гаевая Е.В. Обоснование геоэкологических параметров техногенных грунтов в процессе утилизации буровых шламов // *Экология промышленного производства*. 2024. № 2. С. 2–7. DOI: 10.52190/2073-2589_2024_2_2. EDN: BEH DFA.
23. Гаевая Е.В., Тарасова С.С., Солонина В.А. Применение технологии утилизации буровых отходов с получением строительного материала на примере месторождения Западной Сибири // *Экология и промышленность России*. 2023. Т. 27. № 4. С. 34–39. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-4-34-39. EDN: ORUIZV.
24. Смирнова Т.С., Вишневы В.Д., Алексеев А.А. Утилизация отходов производства и потребления на удаленных месторождениях нефти и газа Арктической зоны РФ // *Экология промышленного производства*. 2024. № 4. С. 2–11. DOI: 10.52190/2073-2589_2024_4_2. EDN: XCUHLY.
25. Джалалов В.З. Анализ современных методов утилизации отработанных буровых растворов и шламов // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2011. № 9. С. 29–35. EDN: OCBXPT.
26. Ягафарова Г.Г., Рахматуллин Д.В., Инсапов А.Н., Кузнецова Г.М., Мирсаитов Н.Р. Современные методы утилизации буровых отходов // *Нефтегазовое дело*. 2018. Т. 16. № 2. С. 123–129. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-2-123-129. EDN: XODFBZ.
27. Штриплинг Л.О., Токарев В.В., Гержберг Ю.М., Краус Ю.А., Логунова Ю.В. Переработка и утилизация нефтешламов и нефтезагрязненных материалов, образующихся в местах добычи, транспортировки и переработки углеводородного сырья: монография. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. 176 с. EDN: RVAYEN.
28. Поварова Л.В. Определение оптимальных способов обезвреживания и утилизации буровых шламов // *Булатовские чтения*. 2020. Т. 5. С. 218–226. EDN: CKTPLZ.
29. Wang X., Jin W., Li Y., Liu S., Xu J., Liu J., et al. Treatment advances of hazardous solid waste from oil and gas drilling and production processes // *Chemical Engineering Journal*. 2024. Vol. 497. P. 154182. DOI: 10.1016/j.cej.2024.154182.
30. Гречаников А.В., Ковчур А.С., Манак П.И. Неорганические осадки химической водоподготовки теплоэлектроцентралей как добавка к строительным материалам общего назначения // *Безопасный и комфортный город: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. (г. Орел, 21–23 марта 2023 г.)*. Орел: Изд-во ОГУ, 2023. С. 407–413. EDN: CIEQCJ.

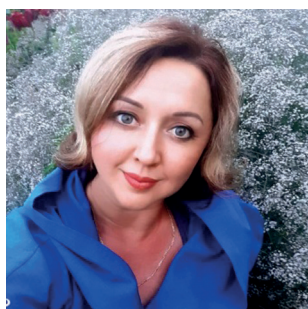
References

1. Zhukov T.N., Glushankova I.S. Research the processes of neutralization and recycling of waste drilling fluids. *Ehkologiya i nauchno-tekhnicheskii progress. Urbanistika*. 2015;1:120-128. (In Russ.). EDN: VUYZYP.
2. Bal A.S., Stewart R., Schliephake K. A review of the current options for the treatment and safe disposal of drill cuttings. *Waste Management & Research*. 2012;30(5):457-473. DOI: 10.1177/0734242X11419892.
3. Gaevaya E.V. Geo-ecological state of the soil cover in the influence zone of the sludge pit at an oil field. *Environmental protection in the oil and gas complex*. 2023;5:42-48. (In Russ.). DOI: 10.33285/2411-7013-2023-5(314)-42-48. EDN: UJHVRB.
4. Bu J., Zhang X., Yan H., Li B., Guo X., Han C., et al. Application of a cationic polymer flocculant for the treatment and recycling of spent oil-based drilling fluids. *ACS Omega*. 2026;11(11):17511-17520. DOI: 10.1021/acsomega.5c11043.
5. Zahran A., Reyad M., Ibrahim A., Salim M., Atiah M., Gamal H. Sustainable drilling mud recycling: engineering solutions for waste minimization and cost optimization. *Kuwait Oil & Gas Show*. 3–5 February 2026, Kuwait. Kuwait; 2026, p. SPE-230969-MS. DOI: 10.2118/230969-MS.
6. Kompasenko E.I., Kadyrov O.R., Mazlova E.A., Ostakh O.S. Improvement of the drilling waste management system when constructing wells on land. *Environmental protection in the oil and gas complex*. 2023;1:33-41. (In Russ.). DOI: 10.33285/2411-7013-2023-1(310)-33-41. EDN: POOLKB.
7. Zimnukhova A.E., Gaevaya E.V. The effect of iron-containing powders on the physical-mechanical properties of drilling cuttings when producing environmentally friendly materials. *Environmental protection in the oil and gas complex*. 2025;4:16-22. (In Russ.). EDN: VIZLYY.
8. Maslov V.V., Telkov V.P., Semyantseva P.K. Geoecological risks in strategic planning of development of hydrocarbon potential of Paleozoic complex of arctic shelf deposits of the Russian Federation. *Proceedings of Gubkin University*. 2024;2:40-50. (In Russ.). EDN: EVLSKW.
9. Reyes-Urrutia A., Fernandez A., Torres-Sciancalepore R., Zalazar-García D., Venier C., Rozas-Formandoy C., et al. Sustainable hazardous mitigation and resource recovery from oil-based drill cuttings through slow pyrolysis: a kinetic and product analysis. *Sustainability*. 2026;18(2):969. DOI: 10.3390/su18020969.
10. Mazlova E.A., Smirnova T.S., Vishnevskiy V.D., Sidorenko M.S. The efficiency of a combined method of disposal of oil-containing waste. *Ecology and Industry of Russia*. 2026;30(1):10-15. (In Russ.). DOI: 10.18412/1816-0395-2026-1-10-15. EDN: MCSOGI.
11. Gaevaya E.V., Rudakova L.V. Development of geoecological safety measures for the technological process of drilling mud disposal. *Industrial Ecology*. 2025;4:2-10. (In Russ.). DOI: 10.52190/2073-2589_2025_4_2. EDN: GZIIAX.
12. Shevchenko A. Russian scientists have developed a technology for recycling drill cuttings. But its effectiveness is unclear. *Neftegaz.ru*. Available from: <https://neftgaz.ru/news/standarts/914865-rossiyskie-uchenye-razrabotali-tehnologiyu-utilizatsii-burovykh-shlamov/> [Accessed 16th March 2026]. (In Russ.).
13. Pugin K.G. Utilization of drilling cuttings in the technological process of asphalt-concrete mixture production. *Ecology and Industry of Russia*. 2025;29(5):34-39. (In Russ.). DOI: 10.18412/1816-0395-2025-5-34-39. EDN: NSQAHN.
14. Vlasov A.S., Pugin K.G., Tyuryukhanov K.Yu., Rudakova L.V., Glushankova I.S., Surkov A.A. Development of a method for producing geoecologically safe road building materials based on drill cuttings. *Ecology and Industry of Russia*. 2020;24(11):19-23. (In Russ.). DOI: 10.18412/1816-0395-2020-11-19-23. EDN: JXAABU.



15. Perevoshchikova A.A., Perevoshchikov R.D., Surkov A.A., Rudakova L.V. Methods of restoring lands disturbed by drill cuttings disposal: current approaches review. *Theoretical and Applied Ecology*. 2025;4:18-27. (In Russ.). DOI: 10.25750/1995-4301-2025-4-018-027. EDN: CRPJJI.
16. Tarasova S.S., Gaevaya E.V. Effect of water-soluble salt content in drilling mud on the mortality of hydrobionts (*Daphnia magna* Straus and *Chlorella vulgaris* Beijer). *Natural and technical sciences*. 2021;7:81-84. (In Russ.). EDN: VKAIRW.
17. Babkina V.A., Zagorskaya A.A., Pimneva L.A. Prospects for treatment of drilling waste liquid fraction by electrocoagulation. *Vestnik mladogo uchenogo UGNTU*. 2022;S3:39-43. (In Russ.). EDN: UYUHAG.
18. Kosach A.F., Memyachkin K.A., Kurbanova R.B., Pedun G.A. Application of drill sludge in the composition of cement-sludge binders in the construction of oil and gas wells. *Architectural, construction and road transport complexes: problems, prospects, innovations: collected materials of the 6th International scientific and practical conference*. 25–26 November 2021, Omsk. Omsk: Siberian State Automobile and Highway University; 2021, p. 395-398. (In Russ.). EDN: GFWPWT.
19. Zimnukhova A.E., Gaevaya E.V. Research of physical and mechanical properties of drilling sludges during its hightemperature neutralization. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2024;32(2):155-162. (In Russ.). DOI: 10.22363/2313-2310-2024-32-2-155-162. EDN: WQYTZY.
20. Gaevaya E.V. Integrated geo-ecological assessment of drill cuttings and approaches to their disposal. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2025;33(2):219-230. (In Russ.). DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-2-219-230. EDN: IGMWYJ.
21. Gaevaya E.V., Rudakova L.V. Study of patterns of changes in salt composition drill cuttings in the process of their disposal. *Theoretical and Applied Ecology*. 2024;2:125-134. (In Russ.). DOI: 10.25750/1995-4301-2024-2-125-134. EDN: AKHBSG.
22. Gaevaya E.V. Justification of geoecological parameters of technogenic soils in the process of recycling drill. *Industrial Ecology*. 2024;2:2-7. (In Russ.). DOI: 10.52190/2073-2589_2024_2_2. EDN: BEHDFA.
23. Gayevaya E.V., Tarasova S.S., Solonina V.A. Application of drill cuttings recovery technology with the production of building material on the example of a deposit in Western Siberia. *Ecology and Industry of Russia*. 2023;27(4):34-39. (In Russ.). DOI: 10.18412/1816-0395-2023-4-34-39. EDN: ORUIZV.
24. Smirnova T.S., Vishnevskii V.D., Alekseev A.A. Recycling of production and consumption waste in remote oil and gas fields of the Russian Arctic. *Industrial Ecology*. 2024;4:2-11. (In Russ.). DOI: 10.52190/2073-2589_2024_4_2. EDN: XCUHLY.
25. Jalalov V.Z. Analysis of modern methods of waste drilling muds and cuttings recycling. *Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse*. 2011;9:29-35. (In Russ.). EDN: OCBXPT.
26. Yagafarova G.G., Rakhmatullin D.V., Insapov A.N., Kuznetsova G.M., Mirsaitov N.R. Modern methods of drilling waste recycling. *Petroleum Engineering*. 2018;16(2):123-129. (In Russ.). DOI: 10.17122/ngdelo-2018-2-123-129. EDN: XODFZB.
27. Shtripling L.O., Tokarev V.V., Gerzhberg Yu.M., Kraus Yu.A., Logunova Yu.V. Processing and disposal of oil sludge and oil-contaminated materials generated at the sites of extraction, transportation, and processing of hydrocarbon raw materials. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2013, 176 p. (In Russ.). EDN: RVAYEN.
28. Povarova L.V. Determination of optimal methods for the neutralize and dispose of drill cuttings. *Bulatovskie chteniya*. 2020;5:218-226. (In Russ.). EDN: CKTPLZ.
29. Wang X., Jin W., Li Y., Liu S., Xu J., Liu J., et al. Treatment advances of hazardous solid waste from oil and gas drilling and production processes. *Chemical Engineering Journal*. 2024;497:154182. DOI: 10.1016/j.cej.2024.154182.
30. Hrachanika A.V., Kauchur A.S., Manak P.I. Inorganic sludge from chemical water treatment of combined heat and power plants as an additive to general construction materials. *Safe and comfortable city: Proceedings of the 6th International scientific and practical conference*. 21–23 March 2023, Oryol. Oryol: Orel State University named after I.S. Turgenev; 2020, p. 407-413. (In Russ.). EDN: CIEQCJ.

Информация об авторах / Information about the authors



Матиенко Ольга Ивановна,

кандидат химических наук,
доцент кафедры нефтегазового дела,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация,
✉ olga_pomazkina@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6731-4253>

Olga I. Matienko,

Ph.D. in Chemistry,
Associate Professor of the Department of Oil and Gas Engineering,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation,
✉ olga_pomazkina@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6731-4253>



Четверикова Валентина Валерьевна,
кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
доцент кафедры нефтегазового дела,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация,
shulga@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-1598-3516>
Valentina V. Chetverikova,
Ph.D. in Geology, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Oil and Gas Engineering,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation,
shulga@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-1598-3516>



Филатова Елена Геннадьевна,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры химии и биотехнологии имени В.В. Тутуриной,
Институт высоких технологий,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация,
filatovaeg@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-3387-2089>
Elena G. Filatova,
Ph.D. in Engineering, Associate Professor,
Associate Professor of the V.V. Tuturina Department of Chemistry and Biotechnology,
School of High Technologies,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation,
filatovaeg@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-3387-2089>

Вклад авторов / Contribution of the authors

О.И. Матиенко – разработка концепции, проведение исследования, написание черновика рукописи.
В.В. Четверикова – формальный анализ, проведение исследования.
Е.Г. Филатова – проведение исследования, редактирование рукописи.
Olga I. Matienko – conceptualization, investigation, writing – original draft.
Valentina V. Chetverikova – formal analysis, investigation.
Elena G. Filatova – investigation, writing – editing.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 01.07.2026; одобрена после рецензирования 20.07.2026; принята к публикации 18.08.2026.
The article was submitted 01.07.2026; approved after reviewing 20.07.2026; accepted for publication 18.08.2026.