

35. Хорош А.И., Хорош И.А. Дизельные двигатели транспортных и технологических машин: учебное пособие. М.: Лань, 2020. 176 с.

Для цитирования: Бухтеев О.М. Применение цифровых моделей для совершенствования процесса эксплуатации и диагностики дизельных двигателей погрузочно-доставочных машин // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 4 (28). С. 38–45.

THE APPLICATION OF DIGITAL MODELS TO IMPROVE THE OPERATION AND DIAGNOSTICS PROCESS OF DIESEL ENGINES IN LOAD-HAUL-DUMP MACHINES

О.М. BUKHTEEV, Postgraduate

National Research Technological University "MISIS",
Building 1, 4, Leninsky pr., Moscow, 119049, e-mail: olemakk@mail.ru

The most relevant techniques for applying digital technologies to improve the efficiency of diesel engines in load-haul-dump (LHD) machines are examined. The main areas of utilizing digital twins, mathematical modeling, and real-time monitoring systems are analyzed. Special attention is given to methods for diagnosing technical conditions and predicting the remaining service life of power units. The prospects for developing intelligent maintenance systems based on Industrial Internet of Things (IIoT) technologies are explored.

Keywords: digital models, diesel engines, load-haul-dump machines, diagnostics, maintenance, digital twins, mathematical modeling.

Поступила в редакцию/received: 24.06.2025; после рецензирования/revised: 30.06.2025;
принята/accepted: 03.07.2025

УДК 622.2

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-4-45-63

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ САПОНИТСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

А.С. ДАНИЛОВ¹, канд. техн. наук, Э.А. КРЕМЧЕЕВ², д-р техн. наук,
Н.М. МАГДЕЕВА¹, студ.

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
199106, Санкт-Петербург, линия 21-я В.О., д. 2, e-mail: Danilov_AS@pers.spmi.ru

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
190121, Санкт-Петербург, ул. Союза Печатников, д. 16, e-mail: kremcheev@mail.ru

© Данилов А.С., Кремчеев Э.А., Магдеева Н.М., 2025

Статья посвящена описанию современных технологий переработки сапонитсодержащих отходов, широко применяемых для очистки сточных вод в строительстве и сельском хозяйстве. Рассмотрены состав и основные свойства указанных отходов. Проанализированы различные способы сгущения сапонитсодержащих

сусpenзий с указанием их преимуществ и недостатков. Приведены наиболее перспективные направления дальнейшего изучения сапонитсодержащих отходов и технологий их переработки.

Ключевые слова: сапонитсодержащая руда, сапонит, глинистая сусpenзия, сорбционные свойства, буровой раствор, взвешенные частицы, сорбент, мелиорант, удобрение, добавка.

ВВЕДЕНИЕ

В Российской Федерации на территории Мурманской и Архангельской областей находятся невостребованные запасы глины (около 32,83 млн т), преимущественно образованной сапонитом – побочным продуктом алмазодобывающей промышленности [1]. Он представляет собой тяжелый минерал, сбрасываемый в открытые водные объекты. Рассматривается возможность использования данного сырья в качестве основы сорбентов [2, 3]. Экспериментально доказаны сорбционные свойства сапонита по отношению к различным металлам и его сходство с другими адсорбентами природного происхождения [4]. Значительная часть исследований сапонитовой глины направлена на изучение ее как мелиоранта, удобрения [5], строительного материала [6], бурового раствора [7]. Сапонит также применяется в качестве кормовой добавки для выращивания цыплят-бройлеров, гусей и кроликов [8, 9].

В период с 2014 по 2025 годы в рамках Федеральной целевой программы «Ликвидация накопленного экологического ущерба» уже на стартовом этапе было выявлено 340 объектов накопленного экологического ущерба [10, 11], что указывает на актуальность проблемы утилизации сапонитсодержащего шлама.

Экспериментальные исследования и проведенный анализ минерального состава [7] показывают, что среди минералов, содержащихся в глинистой взвеси, лидирует сапонит (табл. 1).

Таблица 1. Минеральный состав глинистых взвесей, поступающих на обогащение в поверхности хвостохранилищ [7]

Минерал	Структурная формула	Плотность, кг/м ³	Твердость по Моосу	Содержание, % по массе
Доломит	CaCO ₃ MgCO ₃	2 940	4,0	19,9
Каолинит	Al ₄ [Si ₄ O ₁₀](OH) ₈	2 600	1,5	21,8
Сапонит	(Ca _{0,5} Na) _{0,3} [Mg, Fe ²⁺] ₃ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·4H ₂ O	2 500	2,5	24,5
Серпентит	Mg ₆ [Si ₄ O ₁₀](OH) ₈	2 200	2,5	19,2
Байделлит	(Na, Ca) _{0,3} Al ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ nH ₂ O	2 150	1,0	14,6
Итого				100

Предприятие, разрабатывающее алмазное месторождение в Архангельской области, нацелено на обеспечение эффективной и безопасной добычи полезных ископаемых на основе современных технологических решений. Для этого были отобраны пробы используемой оборотной и карьерной воды, подобраны и разработаны

коагулянты, позволяющие перерабатывать образующиеся на предприятии объемы пустой породы в новый продукт. Установлено, что применение сульфатов щелочных металлов для разделения мельчайших глинистых частиц, в основном состоящих из сапонита, представляется весьма перспективным направлением [12].

Размерно-массовые характеристики и физико-химические свойства сапонита обуславливают высокую устойчивость образуемых им суспензий к осаждению. Существуют различные химические вещества, выступающие в роли коагулянтов и флокулянтов, которые позволяют осаждать мелкодисперсные частицы, уменьшая экологический ущерб [13]. Получаемый осадок содержит достаточно калия и магния для производства минерального удобрения, а высушенная глина может быть использована в качестве наполнителя в производстве морозостойкого бетона [12].

На месторождении содержание алмазов составляет ничтожно малую долю – 0,000 042 %, соответственно, на каждую тонну переработанной руды образуется 99,999 958 % сапонитовых отходов, которые направляются в хвостохранилище [14]. В среднем для обогащения алмазов обогатительной фабрике необходимо 2 600 м³/ч свежей воды с нормативным содержанием 0,5 г/л твердого вещества. В оборотной воде содержится 6...120 г/л взвешенных веществ, что из-за наличия трудноосаждаемых частиц, представленных сапонитом, требует введения дополнительных объемов воды. Следовательно, для сокращения объемов сброса тяжелого минерала в открытые водные объекты необходим переход на комплексную переработку сапонитсодержащей руды [1, 14, 15].

Для решения проблемы уменьшения воздействия на экосистему больших объемов отходов при их складировании и хранении разрабатываются подходы по практическому применению сапонитсодержащей руды для производства силикатных строительных материалов, гидроизоляции при обустройстве полигонов хранения твердых бытовых отходов и радиоактивных могильников, фильтрации сточных вод, а также в медицине.

Широко рассматривается вопрос об использовании сапонита при производстве искусственных почвогрунтов [16]. Такие грунты можно применять вместо естественного растительного грунта при рекультивации нарушенных территорий, свалок промышленных и бытовых отходов и т. п. Проведенные И.В. Тельминовым и его коллегами [17] лабораторные эксперименты показали, что оптимальный состав искусственного грунта для выращивания травы содержит 80 % хвостов и по 10 % торфа и обезвоженного активного ила [17]. Этот состав может быть также использован для изоляции свалок (бытовых и промышленных), карьеров, что способствует решению проблемы утилизации отходов, сохранению объемов естественного растительного грунта и снижению затрат на рекультивацию. Предлагаемые почвогрунты применимы для укрепления откосов дамб, рекультивации свалок, обустройства санитарно-защитных зон предприятий [16].

Разработка месторождений сопряжена с использованием больших территорий под размещение производственных объектов, что приводит к масштабным и долговременным нарушениям компонентов природной среды [18]. На территории Российской Федерации ежегодный прирост объема руды, содержащей от 10 до 99 % сапонита, превышает 3 млн т [19]. Несмотря на то, что объемы образования сапонитсодержащих отходов на профильных горнодобывающих предприятиях огромны и, присутствуя в виде суспензии в промышленной воде, они затрудняют ее повторное использование, технологически возможно сделать производство условно безотходным с соответствующей утилизацией данного вида минерала [1–3].

На рис. 1 показана карта производственного процесса, демонстрирующая соотношение складируемых отходов к добываемой руде. Так, на конец 2020 года в пруд-отстойник заскладировано около 8,23 млн т хвостов, в хвостохранилища отправлено 24,6 млн т [20].



Рис. 1. Производственная площадка: 1 – склад руды; 2 – обогатительная фабрика; 3 – трубопровод; 4 – отвал пустых пород; 5 – хвостохранилище [20]

В целях минимизации негативного воздействия на экосистему как один из возможных вариантов использования сапонитовой пульпы следует рассматривать применение ее в качестве бурового раствора, сорбента, мелиоранта и компонента строительных смесей. Вовлечение в производственный процесс отходов горного производства в виде сапонитовой руды позволит, наряду со значительным экономическим эффектом, существенно уменьшить объемы шламов в хвостохранилищах.

Целью данного обзорного исследования стало выявление наиболее перспективных с экономической и безопасных с экологической точек зрения путей использования сапонитсодержащих отходов в рамках концепции экономики замкнутого цикла.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве материалов исследования рассматривались публикации в научных журналах, в той или иной мере затрагивающие тему образования и повторного использования сапонитсодержащих отходов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Актуальность очистки сапонитсодержащих техногенных вод обусловлена необходимостью организации качественной системы водооборота, обеспечивающей высокое извлечение алмазов в процессах обогащения, снижение экологической нагрузки на окружающую среду и попутное получение целевых товарных продуктов [22].

В статье А.Ю. Облицова приведены характеристики смектитов и указано их содержание: «Потребность обогатительной фабрики в оборотной воде составляет $450 \text{ м}^3/\text{ч}$ с содержанием твердых частиц не более $5 \text{ г}/\text{л}$. Осветление оборотной воды на хвостохранилище происходит с добавлением флокулянта, расход которого составляет $135 \text{ г}/\text{т}$. Минеральный состав твердых частиц на 70% представлен глинистыми минералами, самопроизвольно диспергирующими в водной среде с образованием гелеобразных коллоидно-дисперсных трудносгущаемых частиц твердого» [22].

При попадании в водную среду сапонит образует тонкодисперсную суспензию с низкой скоростью седиментации и невысокой плотностью образующегося осадка. Он приводит к снижению прочностных свойств элементов намывных дамб, отлагаясь в породах, что в свою очередь негативно влияет на их устойчивость. Кроме того, низкая скорость осаждения сапонитовой суспензии затрудняет осветление воды в нужном количестве для реализации замкнутого контура водопотребления [23]. Способы сгущения сапонитсодержащей суспензии приведены в табл. 2.

Таблица 2. Способы сгущения сапонитсодержащей суспензии

Название 1	Суть метода 2	Достоинства 3	Недостатки 4
Замораживание и последующее оттаивание суспензии в прудковой части хвостохранилищ	Технологический процесс обеспечивает четырехкратное уплотнение сапонитовой массы за счет коагуляционной перестройки частиц. Полученный осадок, пригодный для транспортировки и складирования, направляется в карты-хранилища [26]	Способ учитывает погодные условия региона. Циклическое замораживание-оттаивание приводит к прогрессирующему уплотнению осадка, скелет полученного осадка достигает плотности $0,53 \text{ г}/\text{cm}^3$, что в 3 раза превышает исходный показатель [26]	Обратимость процесса, необходим значительный землеотвод и большие материальные затраты на обустройство и организацию работ [26]. В летний период после сброса осветленной воды плотность сгущенного сапонита не превышает $0,7 \text{ т}/\text{м}^3$ (этого недостаточно для промышленного применения и использования в качестве сырья) [28]

Продолжение табл. 2

1	2	3	4
Осаждение частиц с последующим введением углекислого газа и обработкой коагулянтом	Обработка сапонитовой суспензии CO_2 под давлением (2 кгс/см ² , 300 г/кг осадка) разрушает структуру: выделяются карбонаты Mg/Ca, образуются свободные места, на которые встают ионы водорода или металлов, что способствует агрегации частиц [27]	Быстрое сгущение пульпы на больших площадях и получение чистой оборотной воды [27]	Происходит образование карбонатов кальция и магния – растворимых соединений, которые переходят в жидкую часть пульпы, повышая ее минерализацию. При введении коагулянта – серно-кислого алюминия образуется сульфат железа (III) – растворимое соединение, также повышающее минеральность суспензии [28]
Осаждение частиц с обработкой коагулянтом [28] (оксихлоридом алюминия)	Разбавленный слив классификатора (1 250...1 350 кг/м ³) обрабатывается в сгустителе коагулянтом – оксихлоридом алюминия (15 % Al_2O_3) при перемешивании разделяется на очищенную воду, поступающую в цикл, и сгущенный осадок, отводящийся в хвостохранилище [28]	Получение очищенной воды в соответствии с СанПиН 2.1.5.980-00 с вовлечением в процесс очистки всех технологических вод. Получение осадка сгущенной твердой фазы для конусного складирования [28]	Требуются дополнительные утяжелители. Отсутствует уплотненность осадка. Начинает работать при pH среды выше 5,5, необходимо добавление щелочи. Утилизация осадка (4-й класс) [15, 28]
Отстаивание и выделение сапонита с помощью раствора $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Разбавление пульпы водой, отстаивание, отделение осветленной сапонитовой суспензии от песка. Добавление раствора $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ в NaOH , перемешивание и отстаивание для выделения сапонита [29]	Высокая степень очистки. Простота и воспроизводимость с использованием простых реагентов [29]	Длительность процесса отстаивания. Ограниченнная эффективность при высоких концентрациях взвеси [29]

Продолжение табл. 2

1	2	3	4
Реагенты-флокулянты – природные или синтетические высоко-молекулярные вещества	Использование щелочных металлов (K^+/Na^+) приводит к замещению ионов Mg^{2+}/Ca^{2+} в двойном электрическом слое, уменьшая его толщину и высвобождая воду. Одновременно образование малорастворимого сульфата кальция усиливает агломерацию частиц, обеспечивая быстрое осаждение, повышенный выход воды и предотвращает пылеобразование [12]	Применение флокулянтов для осветления оборотной воды требует минимального количества реагента, концентрация которого может варьировать в широком диапазоне (0,005–0,0 005 %), что облегчает управление технологическим процессом осветления и снижает вероятность его сбоев в случае изменения технологических условий, количества и состава исходной пульпы [26]	Плотность и пористость образующегося осадка остаются на уровне, сопоставимом с показателями естественного осаждения [26]

Продолжение табл. 2

1	2	3	4
Флокулянты на основе полиакриламида (катионные и анионные)	<p>Добавление малых количеств (0,02 %) частично гидролизованного полиакриламида с молекуллярной массой $1,2 \cdot 10^7$ в водоемы позволяет снизить скорость испарения воды на 14 %.</p> <p>Флокулянты подвергаются гидролизу в присутствии кислот и щелочей. В экспериментальных условиях гидролиз проводится с добавлением гидроксида кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) [15]</p>	<p>Интенсивное осаждение взвесей. Минимальный расход реагента.</p> <p>Выгодная стоимость: товарная цена 360 руб/кг, при расходе 250 кг затраты составят 90 тыс. руб. (российское производство) [15]</p>	<p>Токсичность: класс опасности: токсичен (допустимая концентрация $\leq 2,0$ мг/кг). Пожароопасность: образует горючие пылевые облака в воздухе. Взрывоопасность: способен формировать взрывоопасные пылевые смеси.</p> <p>Повышенная плотность воды после обработки. Применение реагента увеличивает плотность очищенной воды.</p> <p>Аbrasивный износ оборудования.</p> <p>Растворенные сополимеры (включая акриламид) ускоряют коррозию и износ механизмов.</p> <p>Термочувствительность: при высоких температурах возможно застывание и поликристаллизация.</p> <p>Логистические затраты включают расходы на закупку и транспортировку реагента до месторождения.</p> <p>Налоговая нагрузка: учитывается НДС при закупке материалов.</p> <p>Экологические ограничения: запрещен сброс в канализацию, грунтовые и поверхностные воды [15]</p>

Окончание табл. 2

I	2	3	4
Коагулянты сернокислого или хлористого алюминия	<p>Введение раствора сульфата/хлорида алюминия, используемого в качестве коагулянта, вызывает дестабилизацию системы и агрегацию частиц $\text{NaMg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ и с гидроксидом алюминия, ускоряя осаждение, но не изменяя плотность и пористость осадка, которые остаются на уровне естественного отстаивания [13]</p>	Простота и скорость технологического процесса	Не изменяется пористость и плотность осадка. Сульфат алюминия при гидролизе проявляет значительную химическую активность, что приводит к коррозионному воздействию на оборудование. В ходе реакции образуется серная кислота, которая диссоциирует с выделением ионов гидроксония (H_3O^+), в связи с чем требуется использование коррозионностойких материалов и контроль pH [15]

Исследования, проведенные О.С. Зубковой с коллегами, показывают, что содержание химических соединений в сапонитах составляет:

в верхнем слое: $\text{CaO} - 2-2,57\%$; $\text{MgO} - 20,99\%$; $\text{SiO}_2 - 26,30\%$; $\text{K}_2\text{O} - 1,23\%$ и $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 7,92\%$;

в нижнем слое: $\text{CaO} - 21,48\%$; $\text{MgO} - 19,75\%$; $\text{SiO}_2 - 27,41\%$; $\text{K}_2\text{O} - 1,31\%$ и $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 8,23\%$ [3].

Сапонит входит в группу монтмориллонитов кремниевых пород, минерал бледно-розового цвета, без запаха и вкуса. Общая химическая формула имеет вид $(\text{Ca}_{0,5}\text{Na})_{0,3}[\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}]_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ [24].

Процесс добычи ведется в сложных природных условиях при неразвитой региональной инфраструктуре. Это делает проблему очистки воды актуальной и требующей комплексного решения. Помимо сапонита основными сопутствующими минералами при добыче алмазов являются легкие глинистые минералы: доломит, каолинит, серпентин [25].

Применение сапонитсодержащих материалов в качестве бурового раствора

Буровой раствор оказывает значительное влияние на технико-экономические показатели и качество строительства скважины [30]. На данный момент для бурения используется в основном бентонитовая глина, которая делает буровой раствор более термо- и солестойким, чем растворы, полученные из их индивидуальных глин, поскольку бентонит, как и сапонит, относится к жирным глинам [31, 32].

Замасленные глины проявляют гидрофобные свойства и смазывают металлические части буровой установки, что позволяет снизить коэффициент трения в

металлических контактных парах. Использование отработанных жирных глинистых адсорбентов после изготовления буровых растворов помогает также в утилизации выбросов твердых отходов с хвостохранилищ [32]. К монтморилонитовой группе относятся минералы сапонит, бейделлит, нонtronит, вермикулит. Глины, в которых преобладают минералы этой группы, называют бентонитами [33]. Физические свойства сапонитовой и бентонитовой глины приведены в табл. 3.

Большей частью свойства двух рассматриваемых минералов близки. Можно выделить адсорбционные, ионообменные, каталитические и фильтрационные свойства. М.А. Пашкевич и А.В. Алексеенко [34] указывают на то, что благодаря своим уникальным структурным и химическим свойствам сапонит более эффективно по сравнению с бентонитом задерживает и обезвреживает загрязняющие вещества.

Таблица 3. Сравнение физических свойств сапонитовой и бентонитовой глины

Свойство	Состав, группа	
	Сапонит	Бентонит
	$(Ca_{0,5}Na)_{0,3}[Mg,Fe^{2+}]_3(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$ Является разновидностью обширного семейства бентонитов и относится к группе монтмориллонитов	$Al_2[Si_4O_{10}](OH)_2 \cdot nH_2O$ Представляет собой тонкодисперсные глины, состоящие не менее чем на 60...70 % из минералов группы монтмориллонита
Набухание, %	5,6...6,0	5,1...5,8
Удельный вес, кг/м ³	2 700...3 150	2 500...2 760
Пластичность, %	28,4	42
pH	6,5...7,0	6,0...9,5

Сапонит может быть использован в качестве недорогого сырья для изготовления буровых растворов [7], причем он не уступает по свойствам бентонитовой глине.

Опыты, проведенные Э.Ю. Георгиевой, О.С. Зубковой, М.А. Торопчиной [7] на соответствие физических свойств образцов 88 и 100 г/л сапонитовой пульпы, показали, что результаты удовлетворяют требованиям, предъявляемым к буровым растворам (табл. 4).

Таблица 4. Результаты определения физических свойств сапонитового шлама [7]

Определяемый показатель	Содержание твердого в пульпе, г/л	
	88	100
Плотность ρ , г/см ³	1,055	1,060
CHC, дПа*	5	5
CHC ₁₀ , дПа*	10	10
Условная вязкость, с	18	20
Водоотдача, см ³ /30 мин	24	22

* Статическое напряжение сдвига через 1 и 10 мин соответственно.

Для снижения потерь воды при фильтрации используется метод кольматации песков супензией твердых частиц [35, 36]. Исследования показывают, что при фильтрации глинистой взвеси в пористой среде происходит накопление дисперсных частиц. А.Л. Невзоровым с коллегами установлено, что осаждение сапонита на перфорированном вкладыше не происходит при скорости фильтрации супензии $\geq 3,5$ м/сут [36]. Таким образом, регулирование этого параметра является критически важным фактором [36, 37].

Выход раствора для сапонитового глинородника с вязкостью 20 мПа·с составляет 10 м³/т. Для бентонитовых глин данный показатель варьируется в диапазоне 8...16 м³/т [23].

Для быстрого бурения необходим термостабильный буровой раствор с высокой смазывающей способностью и устойчивостью к химическому воздействию пластовых вод [37–39].

Для минимизации набухания глин и стабилизации пород применяются амфильтрующие вещества (гидрофобные комплексы) [40]. Они образуют защитные адсорбционные слои на частицах глины и оборудования. Сорбированные масла в отработанном адсорбенте взаимодействуют с пластовой водой, формируя барьер, который блокирует поры и микротрешины, предотвращая набухание [41].

Согласно Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года, ключевой задачей нефтяной промышленности является развитие внутреннего рынка. В структуре нефтесервисного инжиниринга бурение скважин занимает ведущее место [42]. В этом контексте применение сапонита в качестве бурового раствора рассматривается как перспективное и экономически выгодное направление.

Применение сапонитсодержащих материалов

в качестве строительного материала

Сапонитсодержащие отходы, представляющие собой глинисто-магнезиальное сырье, могут применяться в производстве:

керамического кирпича и стеновых материалов (керамических, прессованных); цементного клинкера [43, 44].

Функции сапонита в строительных материалах:

активная минеральная добавка, замена энергоемкого клинкера [45, 46]; источник алюминия и железа [47], частично или полностью замещающий глину и пиритные огарки;

глинистый компонент в расширяющих добавках для получения безусадочных цементов [44].

Оптимальный состав добавки для цемента: 15 % мела, 30 % сапонитсодержащих туфов, 55 % фосфогипса (доля в цементе – 15 %) [48].

Исследования показали, что использование высокодисперсного сапонитсодержащего материала в составе портландцемента:

повышает прочность бетона в 1,6 раза;
увеличивает морозостойкость с F100 до F300;
улучшает водонепроницаемость с W6 до W10 [47].

Кроме того, сапонитсодержащие туфы, благодаря их химическому составу и термостойкости, перспективны для производства керамики, стекла и стеклокристаллических материалов [44].

Разработан способ производства добавки на основе сапонитсодержащего минерального осадка [16, 50]. В процессе гидратации компонентов смеси образуются новые гидросиликаты, что усиливает твердение бетона [43].

Применение сапонитсодержащих материалов в качестве сорбента

Сапонитсодержащие материалы эффективны для очистки вод от тяжелых металлов.

Ключевые исследования

Работы В.Г. Миненко, О.С. Зубковой, О.В. Черемисиной раскрывают механизм сорбции ионов металлов модифицированными сапонитами [44–46].

Исследования О.С. Зубковой подтвердили, что сапонитовые гранулы адсорбируют 72 % ионов меди (Cu^{2+}) в статических условиях и могут использоваться для очистки водных растворов.

В гальваническом производстве эффективность удаления Cu^{2+} из сточных вод достигает 94 % [1].

Кислотная промывка насыщенных сапонитов позволяет извлечь до 96,8 % меди и до 95,3 % никеля с получением концентрированных растворов ($Cu > 5 \text{ г/дм}^3$, $Ni > 2,5 \text{ г/дм}^3$).

Практическое применение: лабораторные испытания подтвердили, что сапонитсодержащие сорбенты очищают воду до уровня ПДК для рыбохозяйственных водоемов.

Наибольшие концентрации химических элементов были зафиксированы в образцах, подвергнутых кислотной обработке и активации минерала. Влияние кислотной активации на содержание примесных химических элементов в сапонитах отражено в табл. 5. Проведенные исследования демонстрируют, что кислотная активация способствует формированию значительного количества поверхностных кислотных центров в структуре сапонитов, что, в свою очередь, определяет их повышенную катионаобменную активность.

Таблица 5. Влияние кислотной активации на содержание примесных химических элементов в сапонитах [47]

Группы образцов	Характеристика образцов	Содержание элементов					
		Fe, %	Rb, г/т	Sr, г/т	Y, г/т	Zr, г/т	Nb, г/т
1	Минерал природный	11,11	12	41	21	66	4
2	Минерал очищенный	10,95	13	47	20	75	2
3	Минерал активированный HCl (0,1 моль/л)	10,82	15	47	22	82	2
4	Минерал активированный HCl (0,15 моль/л)	10,05	18	48	23	76	3

Смектиты представляют значительный научный и практический интерес в силу их широкой распространенности, технологичности переработки, а также высокой сорбционной емкости по отношению к газам, молекулам органических и неорганических соединений, а также растворенным ионам.

Применение сапонитов в агрохимии

С момента открытия сапонитовых месторождений ведутся исследования по их использованию в качестве компонента удобрений. В частности, сапониты применяются в сельском хозяйстве для детоксикации почв (включая сорбцию гербицидов, пестицидов и тяжелых металлов), а также используются в качестве наполнителя и гранулята.

Высокая дисперсность и значительные силы поверхностной адсорбции сапонитов оказывают влияние на повышение содержания подвижных форм фосфора и калия в почве.

Прибавка урожая варьировалась в пределах 9...18 ц/га (рис. 2), причем наиболее высокий результат был зафиксирован при минимальной дозе внесения сапонитсодержащих материалов (3,6 т/га), что свидетельствует о высокой агрономической эффективности этого удобрения в условиях Архангельской области [22].

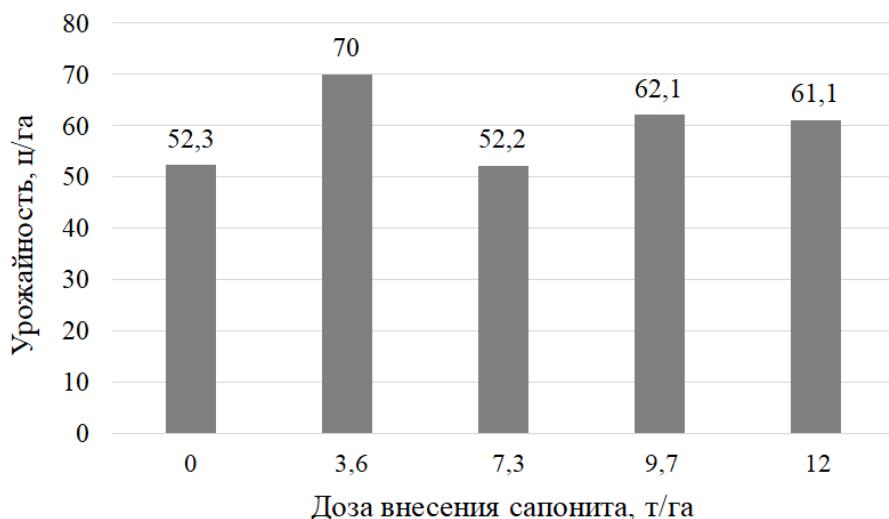


Рис. 2. Урожайность картофеля при различных дозах внесения в почву сапонитсодержащих материалов [22]

Кроме того, в ряде исследований рассматривалось влияние сапонита на продуктивность однолетних трав. В частности, изучено действие водной суспензии сапонита на дерново-слабоподзолистых супесчаных окультуренных почвах (табл. 6), что подтверждает потенциал его использования в качестве мелиоранта [22].

Таблица 6. Средние значения качественных показателей однолетних трав при внесении сапонита

Доза сапонита, т/га	Сухое вещество, %	Сырая зола, %	Сырой протеин, %	Растворимые углеводы (сахар), %	Легко-гидролизуемые углеводы (крахмал), %	Сырая клетчатка, %	Сырой жир, %
Контроль	29,33	13,18	15,05	1,23	2,95	14,05	1,71
3,6	29,48	15,23	15,43	1,43	2,93	15,48	4,06
7,3	32,75	13,85	16,98	1,28	3,55	16,35	3,70
9,7	25,98	12,30	14,63	1,53	3,00	16,00	3,78
12	24,60	12,40	16,55	1,55	2,93	16,23	1,34

На основании предоставленных данных можно сделать следующие выводы о применении сапонита в различных сферах, включая кормопроизводство и фармакологию.

Роль сапонита в кормовых добавках

Биологическое влияние: сапонитсодержащие добавки улучшают обменные процессы, иммунитет, скорость роста и мясную продуктивность птицы за счёт сорбции токсинов (микотоксинов, бактериальных клеток, канцерогенов).

Экономическая эффективность: технологии с использованием минеральных добавок, включая сапонит, экономически обоснованы и могут повышать рентабельность производства кормов.

Применение сапонита в фармакологии в качестве вспомогательного вещества

Сапонит входит в состав таблеток и капсул как смазывающий агент (аналогично стеарату магния).

Может использоваться в качестве наполнителя или разрыхлителя.

Участвует в создании оболочек для лекарственных форм.

Эфферентная терапия

Благодаря слоистой структуре и высокой сорбционной способности сапонит связывает и выводит токсины, метаболиты и патогены из организма (адсорбция, ионный обмен).

Потенциально применим в детоксикационных препаратах и энтеросорбентах.

Перспективы использования сапонитсодержащих материалов в ветеринарии и животноводстве:

улучшение качества кормов,
профилактика микотоксикозов,
повышение продуктивности.

Перспективы использования сапонитсодержащих материалов в медицине:

разработка новых лекарственных форм с улучшенными технологическими свойствами;

создание препаратов для детоксикации (например, при отравлениях, инфекциях).

Таким образом, сапонит является многофункциональным минералом с доказанной эффективностью в животноводстве и перспективным применением в фармацевтике. Дальнейшие исследования могут расширить спектр его использования, включая нано- и биомедицинские технологии.

ВЫВОДЫ

Комплексное применение сапонитовой глины способствует значительному снижению эксплуатационных затрат на строительство и содержание хвостохранилищ, а также минимизации антропогенного воздействия на окружающую среду в зоне производственной деятельности.

В рамках данного обзорного исследования рассмотрены четыре ключевых направления использования сапонитов. Данное природное сырье, относящееся к группе смектитов, обладает значительным потенциалом благодаря таким характеристикам, как экологическая безопасность и богатый минеральный состав. Универсальность сапонитов открывает широкие перспективы их применения в различных отраслях:

медицине – в качестве основы для создания лекарственных препаратов эффективного действия;

ветеринарии – как минеральной добавки к кормам сельскохозяйственных животных;

сельском хозяйстве;
строительной индустрии;
охране окружающей среды.

Сапонит как минерал превосходит другие глинистые компоненты по ряду параметров, включая широту применения, доступность сырьевой базы и экономическую эффективность. Наиболее ярко это подтверждается результатами исследований, посвященных использованию сапонита в качестве модифицирующей добавки к буровым растворам, что отражено в патентах на соответствующие технологии.

Глинистая суспензия, являющаяся побочным продуктом алмазообогатительных фабрик, может быть трансформирована в функциональный компонент строительных материалов, повышающий прочностные характеристики цементных композитов. Кроме того, сапонит демонстрирует высокую эффективность в качестве сорбента, что позволяет применять его как в фармацевтике (благодаря уникальным адсорбционным свойствам), так и в производстве кормовых добавок.

Рециклинг сапонита, обусловленный его особыми физико-химическими свойствами, способствует снижению техногенной нагрузки на предприятие и минимизации риска возникновения чрезвычайных ситуаций за счет сокращения площади хвостохранилищ при внедрении инновационных технологий переработки данного материала.

Таким образом, сапонит представляет собой универсальный минерал, который после извлечения из оборотного водоснабжения (например, методом коагуляционного сгущения) находит применение в различных отраслях промышленности. Использование сапонитсодержащих материалов не только способствует снижению экологической нагрузки, но и обеспечивает экономическую выгоду, что делает его перспективным сырьевым ресурсом.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSRW-2024-0005).

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев А.И., Зубкова О.С., Полянский А.С. Усовершенствование технологии обогащения сапонитовой руды в процессе добычи алмазов // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2020. № 1. С. 74–80.
2. Minenko V.G. Adsorption properties of modified saponite in removal of heavy metals from process water // *Journal of Mining Science*. 2021. V. 57. № 2. P. 298–306.
3. Зубкова О.С., Пягай И.Н., Панкратьева К.А., Торопчина М.А. Разработка состава и исследование свойств сорбента на основе сапонита // *Записки Горного института*. 2023. Т. 259. С. 21–29.
4. Кошелев А.В., Веденеева Н.В., Заматырина В.А., Тихомирова Е.И., Скиданов Е.В. Разработка технологии получения сорбентов на основе бентонитовых глин для систем очистки воды // *Вода и экология: проблемы и решения*. 2018. № 2 (74). С. 32–39.
5. Босак В.Н., Стрельцова Г.Д., Кузьменкова О.Ф., Сачивко Т.В. Влияние сапонитсодержащих базальтовых туфов на продуктивность сельскохозяйственных культур // *Земледелие и растениеводство*. 2022. № 5. С. 6–9.

6. Вешнякова Л.А., Айзенштадт А.М., Фролова М.А. Оценка поверхностной активности высокодисперсного сырья для композиционных строительных материалов // *Физика и химия обработки материалов*. 2015. № 2. С. 68–72.
7. Георгиева Э.Ю., Зубкова О.С., Торопчина М.А. Использование сапонитового шлама месторождения имени М.В. Ломоносова для приготовления бурового раствора // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2021. № 3. С. 79–84.
8. Prasai T.P., Walsh K.B., Bhattacharai S.P., Midmore D.J., Van Thi T. H., Moore R.J., Stanley D. Biochar, bentonite and zeolite supplemented feeding of layer chickens alters intestinal microbiota and reduces campylobacter load // *PLoS one*. 2016. V. 11. № 4. P. 0154061.
9. Цветкова А.М. Эффективность использования сорбентов в кормлении молодняка кроликов: дис. ... канд. с/х наук. Пос. Родники, 2013. 130 с.
10. Федеральная целевая программа «Ликвидация накопленного экологического ущерба» на 2014–2025 годы. URL: <https://минприроды.рф> (дата обращения: 03.03.2025).
11. Болтыров В.Б., Стороженко Л.А., Сапсай М.А. Накопленный экологический вред территорий размещения горнoprомышленных отходов прошлых лет // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2021. № 5–2. С. 202–217.
12. Зубкова О.С., Алексеев А.И., Сизяков В.М., Полянский А.С. Исследование влияния сернокислых солей на процесс отстаивания глинистой суспензии // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2022. Т. 65. Вып. 1. С. 44–49.
13. Аверкина Е.В., Шакирова Э.В., Бутакова Л.А. Влияние реагентов-флокулянтов на параметры глинистых суспензий // *Науки о Земле и недропользование*. 2020. Т. 43. № 2. С. 230–241.
14. Панкратьева К.А., Зубкова О.С. Комплексная переработка сапонитовых руд Ломоносовского месторождения алмазов // *Успехи в химии и химической технологии*. 2021. Т. 35. № 8. С. 129–131.
15. Разработка технологии очистки воды для обогатительной фабрики Ломоносовского ГОКа ПАО «Севералмаз» от взвешенных веществ с применением кальций-алюмосиликатного реагента: отчет о научно-исследовательской работе № 153-03-19 СА от 15.03.2019. СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2019. 61 с. URL: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1754120527&tId=ru&lang=ru&name=alekseevai-alrosa.pdf&text=15.%20Санкт-Петербургский%20горный%20университет> (дата обращения: 03.04.2025).
16. Ланг И.В., Петрова Т.А. Обзор существующих направлений и методов утилизации отходов обогащения алмазоносной руды // *Шаг в будущее: теоретические и прикладные исследования современной науки: Материалы XVI молодежной Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных*. СПб.: CreateSpace, 2018. С. 36–40.
17. Тельминов И.В., Невзоров А.Л., Заручевых И.Ю., Корзова М.А. Искусственные почвогрунты из отходов обогащения кимберлитовой руды // *Вестник МГСУ*. 2012. № 1. С. 128–132.
18. Тесленок С.А., Шперль Д.А. Загрязнение окружающей среды при открытой добыче полезных ископаемых // *Огарев-Online*. 2023. № 4 (189). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zagryaznenie-okrughayushey-sredy-pri-otkrytoy-dobyche-poleznyh-iskopаемyh> (дата обращения: 02.08.2025).
19. Севералмаз. Деятельность предприятия. URL: <http://www.severalmaz.ru/o-kompanii/deyatelnost/> (дата обращения: 03.04.2025).

20. Севералмаз. Карта производственного процесса. URL: <https://severalmaz.ru/proizvodstvo/protsess-proizvodstva/map/severalmaz.html> (дата обращения: 10.03.2025).
21. Облицов А.Ю. Утилизация отходов обогащения алмазосодержащей породы с учетом специфики месторождения им М.В. Ломоносова // *Записки Горного института*. 2011. Т. 189. С. 141–145.
22. Романов Е.М., Наквасина Е.Н., Косарева Е.Н. Применение водной суспензии сапонита на дерново-слабоподзолистой супесчаной окультуренной почве в качестве мелиоранта // *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*. 2020. № 8 (161). С. 9–17.
23. Алексеев А.И., Зубкова О.С., Полянский А.С. Очистка карьерных вод ПАО «Севералмаз» от дисперсных частиц глинистого минерала сапонита методом сгущения // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. 2020. № 55 (81). С. 22–27.
24. Умиров Ф.Э., Музафаров А.М., Пирназаров Ф.Г., Умиров У.Ф. Изучение химического состава и свойств минерала сапонита // *Горный вестник Узбекистана*. 2020. Т. 3 (82). С. 76–78.
25. Чантuria В.А., Двойченкова Г.П., Ковальчук О.Е. Поверхностные свойства алмазов метасоматически измененных кимберлитов и их модификация в условиях переработки минерального сырья // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2015. № 2. С. 137–148.
26. Карпенко Ф.С. Условия накопления сапонитсодержащих осадков и технология их сгущения в хвостохранилище месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова: дис. ... канд. геол.-минер. наук. М., 2009. 155 с.
27. Патент РФ 2448052. *Способ сгущения сапонитовой суспензии* / Утин А.В. Заявл. 08.11.2010. Опубл. 20.04.2012. Бюл. № 11.
28. Патент РФ 2669272. *Способ сгущения сапонитовой суспензии* / Алексеев А.И., Конончук О.О., Зубкова О.С., Бричкин В.Н. Заявл. 15.01.2018. Опубл. 09.10.2018. Бюл. № 28.
29. Патент РФ 2780569 *Способ очистки оборотной воды горнодобывающей промышленности от сапонитсодержащего материала и песка* / Малыгина М.А., Айзенштадт А.М., Данилов В.Е., Пожилов М.А. Заявл. 19.11.2021. Опубл. 27.09.2022. Бюл. № 27.
30. Патент РФ 2490293. *Способ приготовления гидрофобного эмульсионного бурового раствора методом инверсии фаз для бурения пологих и горизонтальных скважин* / Нацепинская А.М., Попов С.Г., Некрасова И.Л., Гаршина О.В., Гребнева Ф.Н., Хвошин П.А., Окромелидзе Г.В., Ильясов С.Е. Заявл. 13.02.2012. Опубл. 20.08.2013. Бюл. № 23.
31. Базаров Г.Р., Абдурахимов С.А. Разработка технологии получения термо- и солестойких буровых растворов из полиминеральных композиций с использованием механо-химического способа их диспергирования // *Нефтегазовое дело*. 2023. Т. 21. № 3. С. 11–16.

32. Базаров Г.Р. Рациональное использование отработанных жирных глин при получении буровых растворов // *Universum: технические науки*. Электрон. научн. журн. 2019. № 11 (68). URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/8133> (дата обращения: 02.08.2025).
33. Кудайқулова Г.А. Буровые глинистые растворы: учебное пособие. Алматы: КазНТУ, 2003. 137 с.
34. Pashkevich M.A., Alekseenko A.V. Reutilization prospects of diamond clay tailings at the Lomonosov mine, Northwestern Russia // *Minerals*. 2020. V. 10. № 6. P. 517.
35. Мязин В.П., Попова Г.Ю., Татауров С.Б. Использование реагентов-кольматантов для снижения фильтрационных потерь воды в системах оборотного водоснабжения промывочных установок // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 1996. № 6. С. 46–48.
36. Невзоров А.Л., Саенко Ю.В., Ширанов А.М. Модификация песка суспензией сапонитовой глины – одним из отходов алмазодобывающей промышленности // *Construction and Geotechnics*. 2022. Т. 13. № 4. С. 103–115.
37. Дмитриев А.Ю. Основы технологии бурения скважин: учебное пособие. Томск: ТПУ, 2008. 216 с.
38. Гасумов Р.Р., Димитриади Ю.К., Лукьянов В.Т., Федоренко В.В. Совершенствование составов буровых растворов для проводки скважин в сложных термобарических условиях // *Наука. Инновации. Технологии*. 2017. № 4. С. 137–156.
39. Патент РФ 2698389. Высокоингибированный безглинистый эмульсионный буровой раствор / Грисюк П.В. Заявл. 26.10.2018. Опубл. 26.08.2019. Бюл. № 24.
40. Ширякина Ю.М., Китаева Н.С., Афанасьева Е.А., Бутузов А.В. Амфи菲尔ные соединения и гидрофобизация (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 7 (113). С. 99–115.
41. Журов М.М. Технология получения и исследование свойств микродисперсного гидрофобного адсорбента на основе бентонитовой глины для ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларусь*. 2017. Т. 1. № 2. С. 203–214.
42. Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 года № 1523-р. URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202006150_001 (дата обращения: 25.05.2025).
43. Фролова М.А., Морозова М.В., Айзенштадт А.М., Тутыгин А.С. Алюмосиликатное вяжущее на основе сапонитсодержащих отходов алмазодобывающей промышленности // *Строительные материалы*. 2017. № 7. С. 68–70.
44. Морозова М.В., Айзенштадт А.М., Махова Т.А. Использование сапонитсодержащих отходов в качестве компонента сухой строительной смеси для мелкозернистых бетонов с улучшенными эксплуатационными характеристиками // *Academia. Архитектура и строительство*. 2015. № 4. С. 137–141.
45. Еленова А.А., Кривобородов Ю.Р. Синтез расширяющей добавки для устранения усадки цементного камня // *Вестник МГСУ*. 2017. № 3. С. 326–333.
46. Морозова М.В. Эксплуатационные характеристики бетонов, модифицированных высокодисперсным сапонитсодержащим материалом // *Вестник СибАДИ*. 2018. Т. 15. № 2 (60). С. 269–275.
47. Калинин И.В., Богатыренко В.А., Нестеровский В.А. Использование кислотно-активированных сапонитов в качестве природных сорбентов // *Ukrainian Journal of Ecology*. 2018. Т. 8. № 2. С. 134–139.

48. Стрельцова Г.Д., Кузьменкова О.Ф., Кольненков В.П., Бабец М.А., Босак В.Н., Баранцева С.Е., Лугин В.Г. Сапонитсодержащие базальтовые туфы – перспективное силикатное и агрохимическое сырье. *Проблемы рационального использования природных ресурсов и устойчивое развитие Полесья: Сборник докладов Международной научной конференции: в 2 т.* Минск: Беларуская навука, 2016. Т. 1. С. 565–569.

49. Новоселов А.Г., Дреер Ю.И., Новоселова И.Н., Васина Ю.А. Эффективность использования техногенного продукта электролитического производства алюминия в качестве минерализатора при обжиге портландцементного клинкера // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2022. № 5. С. 71–80.

50. Федюк Р.С., Мочалов А.В., Лесовик В.С. Современные способы активации вяжущего и бетонных смесей (обзор) // *Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2018. № 4 (37). С. 85–99.

Для цитирования: Данилов А.С., Кремчев Э.А., Магдеева Н.М. Перспективы использования сапонитсодержащих отходов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 4 (28). С. 45–63.

PROSPECTS FOR THE USE OF SAPONITE-CONTAINING WASTE

A.S. DANILOV¹, Cand. Sc., E.A. KREMCHEEV², Dr. Sc., N.M. MAGDEEVA¹, Stud.

¹Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
2, 21 liniya V.O., 199106, St. Petersburg, e-mail: Danilov_AS@pers.spmi.ru
²National research university "High school of economics",
16, Soyuza Pechatnikov st., 190121, St. Petersburg, e-mail: kremcheev@mail.ru

This article describes modern technologies for processing saponite-containing waste, which is widely used for wastewater treatment, construction, and agriculture. The composition and main properties of this waste are discussed. Various methods for thickening saponite-containing suspensions are analyzed, highlighting their advantages and disadvantages. The most promising areas for further study of saponite-containing waste and its processing technologies are presented.

Keywords: saponite-containing ore, saponite, clay suspension, sorption properties, drilling mud, suspended particles, sorbent, ameliorant, fertilizer, additive.

Поступила в редакцию/received: 01.08.2025; после рецензирования/revised: 11.08.2025;
принята/accepted: 11.08.2025