

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИРОДНЫХ ГЛИНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ ЯДЕРНОЙ И РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОГО НАСЛЕДИЯ

В. В. Крупская^{1,2}, Д. В. Бирюков¹, П. Е. Белоусов², В. А. Лехов³, А. Ю. Романчук³, С. Н. Калмыков³

¹Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН),
Москва, Россия

²Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук
(ИГЕМ РАН), Москва, Россия

³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ им. М. В. Ломоносова), Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 25 апреля 2018 г.

В статье рассмотрены вопросы, связанные с изучением состава, строения и свойств глинистых минералов как компонентов инженерных барьеров безопасности при изоляции объектов ядерного наследия, которые могут лечь в основу Программы по разработке и созданию композиций глинистых материалов для обеспечения безопасности различных объектов использования атомной энергии.

Ключевые слова: глинистые материалы, объекты ядерного наследия, изоляция РАО, инженерные барьеры.

Введение

Широкий диапазон полезных свойств глин и глинистых материалов известен достаточно давно, чем и объясняется масштабный объем их добычи и различные области применения. Также хорошо известно, что игнорирование многочисленных особенностей глинистых материалов, связанных со свойствами сырья и способами их обработки, неизбежно обрекает на недоиспользование высокого потенциала этих материалов или на еще более проблемные ситуации.

Так, эффект недоизученности свойств глинистых материалов в совокупности с игнорированием технологий обработки и производства барьерных систем в полной мере проявился на объектах ядерного наследия и в целом ряде экологических мероприятий по ликвидации аварий на предприятиях атомной отрасли. Наиболее интенсивным стало применение глинистых материалов после аварии на Чернобыльской атомной электростанции. Тогда в ходе проведения работ по ликвидации последствий в

кратчайшие сроки были осуществлены мероприятия по защите источников водоснабжения и поверхностных вод от радиоактивного загрязнения, в частности р. Днепр. В рамках водоохраных мероприятий были сооружены фильтрующие завесы как барьеры для связывания радионуклидов и предотвращения их миграции в открытую гидрографическую сеть. К сожалению, применение глинистых материалов не дало ожидаемого эффекта, а в ряде случаев привело к неблагоприятным экологическим последствиям в виде подтопления территорий близлежащих лесов [1].

Что касается объектов ядерного наследия, в конструкции которых проектом на сооружение было предусмотрено применение глинистых материалов в качестве барьерных, следует выделить ситуацию с водоемом-хранилищем Б-25 АО «СХК». По результатам обследования водоема в 2003 году было выявлено, что целостность противодиффузионного экрана нарушена.

Такая ситуация потребовала проведения мероприятий по разработке и внедрению дополнительных мер для предотвращения миграции радионуклидов из хранилища радиоактивных отходов (РАО).

Тем не менее успешный зарубежный опыт (США, Франция, Швеция) демонстрирует широкие возможности применения глинистых материалов как для реализации проектов по выводу из эксплуатации объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) [2, 3], так и при сооружении пунктов хранения/захоронения РАО.

Применение глин и глинистых материалов

Глины в качестве материала инженерных барьеров играют важную роль в обеспечении безопасности ОИАЭ и могут быть использованы для:

- создания противомиграционных барьеров безопасности с заданными высокими сорбционными и низкими фильтрационными свойствами при консервации объектов ядерного наследия;
- создания барьеров при выводе из эксплуатации ОИАЭ по варианту «захоронение на месте»;
- консервации ячеек захоронения РАО (отсеков, камер, секций), подъездных тоннелей и других вспомогательных помещений, создания герметичных перегородок;
- кондиционирования РАО в качестве матричного материала;
- создания барьеров безопасности на планируемых к сооружению объектах приповерхностного и глубинного захоронения РАО.

Использование глинистых материалов в качестве компонентов инженерных барьеров в пунктах захоронения/хранения позволяет обеспечить следующее:

- ограничить доступ подземных вод к РАО;
- создать условия, при которых массообмен между отходами и подземными водами возможен лишь посредством диффузии;
- обеспечить эффективную сорбцию радионуклидов при вероятной разгерметизации контейнеров (канистр, бочек и т. д.) с отходами;
- запечатать открытые трещины и крупные поры в горных породах за счет высокой набухаемости.

Указанные выше свойства глинистых материалов обуславливают их широкое применение в качестве компонентов барьерных систем при проведении работ по повышению уровня безопасности объектов ядерного наследия. Первоначально при разработке федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года» (далее — ФЦП ЯРБ), планировалось проведение работ с применением глинистых материалов приблизительно на 40 объектах. Однако ввиду низкой степени готовности проектных материалов пришлось отказаться от выполнения целого ряда мероприятий. Тем не менее был выполнен большой объем работ, в рамках которых вопрос о применении глинистых материалов решался более выверено, с существенно большим научным обоснованием, чем ранее. К таким работам стоит отнести мероприятия по выводу из эксплуатации водоемов-хранилищ ЖРО и промышленных реакторов, начатые еще в 90-е годы прошлого века. Наиболее показательным стало проведение мероприятий на объектах АО «СХК» и АО «ОДЦ УГР», в рамках которых был реализован большой комплекс НИОКР с привлечением различных специализированных организаций.

В табл. 1 приведены сведения о наиболее крупных выполненных работах по созданию дополнительных барьеров безопасности с применением глинистых материалов в рамках ФЦП ЯРБ [4].

В 2008 году завершены работы по консервации водоема-хранилища 354 ФГУП «ГХК», изоляция которого потребовала создания барьерной системы на основе комбинации супеси, гравия и суглинки. В итоге суммарная мощность покрывающего экрана составила 8,5 м.

В 2012 году в полном объеме выполнены работы по консервации водоема-хранилища Б-2, предусматривавшие засыпку акватории объекта крупнодисперсными материалами с последующим сооружением покрывающего глиняного экрана для обеспечения гидроизоляции объекта.

Для водоемов-хранилищ Б-2 и Б-25 была разработана и апробирована технология создания инъекционными методами дополнительных защитных (противофильтрационных) барьеров

Таблица 1. Сведения о выполненных работах по созданию дополнительных барьеров безопасности с применением глинистых материалов

№	Объект	Организация	Площадь объекта, тыс. м ²	Тип сооруженного защитного барьера	Затраченные глинистые материалы, т
1.	Водоем-хранилище 354	ФГУП «ГХК»	25	Противофильтрационный, сорбционный покрывающий экран	160 000
2.	Водоем-хранилище Б-2	АО «СХК»	57,3	Противофильтрационный, сорбционный покрывающий экран	105 600
3.	ПУГР ЭИ-2	АО «ОДЦ УГР»	5,6	Противофильтрационный, сорбционный барьер и покрывающий экран	75 200 (включая заполнение шахты реактора)

безопасности на основе жидкого стекла, первоначально не предусмотренных проектными решениями. Инъекционные противотриационные барьеры широко используются в строительстве для ограничения миграции загрязняющих веществ и теперь успешно стали применяться для ОИАЭ [5].

В 2015 г. завершены работы по выводу из эксплуатации промышленного уран-графитового реактора (ПУГР) ЭИ-2 АО «ОДЦ УГР» по варианту «захоронение на месте» с созданием пункта консервации особых РАО. Безопасность захоронения реакторного комплекса обеспечивается использованием существующих и созданием дополнительных барьеров безопасности. В результате был проведен комплекс НИОКР, направленных на разработку и обоснование технологий создания барьерных систем на основе природных материалов, включая их подготовку и способ заполнения. В качестве материалов для создания дополнительных барьеров применялись специально разработанные глинистые композиции как для засыпки шахты реактора и приреакторных помещений, так и для сооружения покрывающего экрана [6]. Разработанные и апробированные технологии предполагается использовать для других ПУГР при их выводе из эксплуатации с учетом геологических и гидрогеологических условий их месторасположения.

В ходе выполнения работ в рамках ФЦП ЯРБ накоплен опыт и выработаны референции по закрытию поверхностных водоемов-хранилищ ЖРО, выводу из эксплуатации ПУГР и созданию дополнительных барьеров безопасности с применением глинистых материалов. Однако, несмотря на достигнутые успехи при реализации мероприятий ФЦП ЯРБ, все они имели один ярко выраженный недостаток — разрозненность при решении общих задач без понимания того, какое количество объектов потребует применения глинистых материалов и какого состава, каковы объемы добычи и рынки сбыта таких материалов.

Работы по инвентаризации ОИАЭ и первичной регистрации РАО, проведенные в рамках ФЦП ЯРБ, позволили создать информационную основу для решения проблем ядерного наследия. В результате в отношении 700 объектов

приняты решения по выводу из эксплуатации (ликвидация, захоронение на месте) или модернизации с целью повышения уровня безопасности [7], из которых для порядка 70 пунктов хранения в той или иной степени потребуется применение глинистых материалов для захоронения особых РАО на месте. Есть предпосылки к тому, что количество таких объектов может существенно увеличиться как за счет включения новых, так и за счет тех, в отношении которых принятие решений было отложено. В табл. 2 представлена предварительная оценка объемов глинистых материалов, которые потребуются в ближнесрочной перспективе при выводе из эксплуатации различных ОИАЭ. Эти объемы могут быть значительно сокращены за счет применения инновационных материалов и подходов к их созданию, которые стали доступны или скоро будут доступны на российском рынке. Краткий обзор потенциальных материалов будет дан ниже.

В перспективе до 2030 года круг объектов, которые предстоит вывести из эксплуатации по варианту «захоронение на месте», уже очерчен. Это водоем Б-25, хвостохранилище ПХ-1,2, АО «СХК», водоем В-17 ФГУП «ПО «Маяк», хвостохранилище № 1 ПАО «НЗХК» и др. Кроме того, сюда входят семь ПУГР с приреакторными хранилищами РАО [4]. Работы планируется выполнить в рамках федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года».

Итак, опыт последних лет по повышению уровня радиационной безопасности ОИАЭ показал перспективность применения глинистых материалов в различном качестве как компонентов инженерных барьерных систем. При этом технология сооружения и состав материалов инженерных барьеров должны выбираться с учетом класса и типа РАО, конструкции и геометрии объекта, а также геологических и гидрогеологических условий их локализации.

Масштабное проведение работ по обеспечению долгосрочной безопасности ОИАЭ требует разработки системы защитных инженерных барьеров для предотвращения поступления радионуклидов в окружающую среду. Барьерные

Таблица 2. Предварительная оценка объемов глинистых материалов, которые потребуются в ближнесрочной перспективе

Тип объекта	Количество объектов	Виды работ с применением глинистых материалов	Предварительная оценка требующихся глинистых материалов, тыс. т
Промышленные реакторы и приреакторные хранилища РАО	24	Сооружение сорбционных, противотриационных покрывающих экранов	800
Водоемы-хранилища	13	Сооружение противотриационных, сорбционных барьеров и покрывающих экранов	11 000
Пункты хранения ТРО (специальные сооружения и грунтовые могильники)	>30	Сооружение сорбционных, противотриационных покрывающих экранов	500

системы должны обладать необходимыми свойствами, чтобы обеспечить безопасное и надежное длительное хранение РАО, и при этом все компоненты барьерной системы также должны сохранять стабильность в течение всего времени эксплуатации.

Характеристика глин как барьерных материалов

Глинистые породы и материалы на их основе могут иметь различный гранулометрический и минеральный состав. Для создания инженерных барьеров наиболее предпочтительны материалы с содержанием тонкодисперсной фракции (<2–5 мкм) не менее 30–50% в зависимости от состава глинистых минералов. Тонкодисперсные фракции представлены преимущественно глинистыми минералами с различным примесным содержанием полевых шпатов, кварца и других минералов.

Полезными качествами для создания инженерных изоляционных барьеров (ИИБ) обладают в данном аспекте только глинистые минералы, которые по своим свойствам могут значительно различаться, что определяется особенностями их состава и кристаллического строения. Основными характеристиками глинистых материалов как потенциальных составляющих изоляционных противомиграционных барьеров являются такие показатели: коэффициент фильтрации и диффузии, пористость, проницаемость, емкость катионного обмена, коэффициенты сорбционного распределения радионуклидов, кинетические параметры, количество и характер сорбционных центров, размер кристаллитов, величина удельной поверхности, индекс и давление набухания и т. д.

Глинистые минералы относятся к подклассу филлосиликатов, класс силикаты, согласно номенклатуре, принятой Международной минералогической ассоциацией IMA, подразделяются на две группы [8–10] по типу соединения между собой тетраэдрических и октаэдрических сеток — 1:1 (ТО) и 2:1 (ТОТ), и отличаются количеством изоморфных замещений, определяющих заряд слоя. Особенности строения глинистых

минералов определяют их физико-химические и механические свойства. Изображения основных глинистых минералов, сделанные при помощи электронного микроскопа, приведены на рис. 1.

В основе строения минералов типа 1:1 лежит соединение одной тетраэдрической и одной октаэдрической сетки. К этому типу относятся минералы группы каолинита-серпентина: каолинит, галлуазит, лизардит, бертьерин и др. Для минералов типа 1:1 характерна низкая степень изоморфного замещения в структуре слоя, что приводит к низким емкостным и сорбционным свойствам (табл. 3). Ввиду особенностей строения, а также того, что для минералов этого типа характерно образование довольно крупных агрегатов частиц (в среднем 5–10 мкм), каолиновые глинистые породы отличаются низкой набухаемостью и более высокой водопроницаемостью (высокой диффузией).

В основе строения минералов типа 2:1 лежит слой, состоящий из двух тетраэдрических сеток и заключенной между ними октаэдрической сетки. Для минералов этого типа характерно присутствие катионов и/или молекул воды в составе межслоевого промежутка (межслоя). При схожем строении слоя для всех слоистых силикатов типа 2:1 характер состава межслоя отличается в значительной степени, что определяется характером и количеством изоморфных замещений. К этому типу относятся: группы истинных слюд (мусковит, биотит, флогопит и т. д.), слюд с дефицитом межслоя (иллит, глауконит), смектитов (монтмориллонит, сапонит и т. д.), вермикулитов (вермикулит), группа хлоритов (клинохлор, шамозит и т. д.), которую ранее относили к типу 2:1:1 минералов.

Наибольшее распространение в составе природных глин, суглинков и других осадочных пород имеют 4 группы глинистых минералов (табл. 3): слюдяных минералов, смектита, каолинита и хлорита. Как упоминалось выше, физико-химические, механические и другие свойства глинистых материалов, которые потенциально могут быть использованы в качестве материалов инженерных барьеров, обусловлены особенностями их состава и строения.

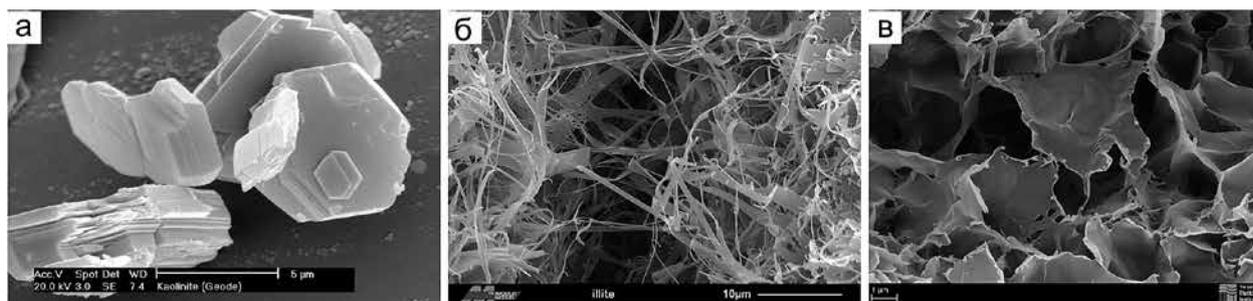


Рис. 1. Электронные микрофотографии частиц глинистых минералов: а) каолинит, б) иллит, в) смектит (по материалам сайта <http://www.minersoc.org>)

Таблица 3. Состав и свойства основных групп глинистых минералов

Тип слоя	Группа	Примеры минералов	Способность к набуханию	Наименование глинистой породы, где данный минерал является основным	Сорбционная способность по отношению к тяжелым металлам и радионуклидам	Показатели фильтративной способности	Образуют промышленно-значимые скопления (месторождения)	Потенциальная перспектива использования для создания инженерных барьеров
1:1	Каолинит ^(1,2)	каолинит, диккит, накрит	низкая	каолины	низкая	высокие	да, есть в РФ	средняя
		галлаузит	низкая		средняя	высокие	да, есть в РФ	средняя
	Истинные слюды ^(1,2)	мусковит, флогопит, биотит	низкая	компонент полиминеральных глин	низкая	высокие	нет	отсутствует
		Слюды с дефицитом межслоя ^(1,2)	низкая		низкая	высокие-средние	да, нет в РФ	отсутствует
2:1	Смектиты ^(3,2)	монтмориллонит, бейделит, сапонит	высокая	бентониты	высокая	низкие	да, есть в РФ и странах СНГ	высокая
		Вермикулиты ^(4,2)	высокая (для дисперсных разностей)		вермикулиты	высокая (для дисперсных разностей)	средние-низкие (для дисперсных разностей)	да, есть в РФ
	Хлориты ^(1,2)	клинохлор, шамозит	низкая	компонент полиминеральных глин	низкая	высокие	нет	отсутствует
		Пальгорскиты ^(5,2)	низкая		пальгорскиты	средняя	высокие-средние	да, есть в РФ
1:1 и 2:1	Смешаннослойные минералы (ССМ) ^{** (2)}	каолинит-смектит	низкая-средняя ^{***}	компонент полиминеральных глин	низкая-средняя ^{***}	низкая-средняя ^{***}	нет	отсутствует
		иллит-смектит	низкая-высокая ^{***}		низкая-высокая ^{***}	низкая-высокая ^{***}	да, нет в РФ	отсутствует

* Относятся к непланным (не слоистым) филлосилкатам.

** Для смешаннослойных минералов приведены только примеры наиболее часто встречающихся в грунтах и осадочных породах минеральных разновидностей.

*** Свойства смешаннослойных минералов сильно различаются и зависят от состава и строения компонентов, входящих в состав ССМ.

Цифрами отмечены глины, в которых данные минералы имеют порообразующее значение: 1 – каолиновые глины, 2 – смешанные полиминеральные глины, 3 – бентонитовые глины, 4 – вермикулитовые глины, 5 – пальгорскитовые или сепиолитовые глины.

Наиболее контрастными по своим физико-химическим свойствам являются слюдяные и смектитовые минералы [11–15]. Для слюдяных минералов (мусковиты, иллиты и т. д.) характерно высокое количество изоморфных замещений и локализация их преимущественно в составе тетраэдрических сеток, что приводит к фиксации катионов калия в межслоевом промежутке, относительно крупным агрегатам частиц (1–5 мкм), низкой обменной емкости, низкой набухаемости и относительно высокой водопроницаемости. Слюды с дефицитом межслоя (иллиты, глаукониты) отличаются от истинных слюд уменьшением количества изоморфных замещений, что приводит к небольшому увеличению набухания и дисперсности.

Каолиниты, ввиду особенностей строения слоя и практически полного отсутствия изоморфных замещений, отличаются крупными размерами частиц, обладают низкими показателями емкости катионного обмена, отсутствием набухания и характеризуются слабыми противодиффузионными свойствами. Хлориты, как правило, содержатся в примесных количествах и не образуют промышленных скоплений.

При этом каолиниты, иллиты и хлориты часто являются компонентами осадочных пород, которые могут потенциально использоваться в качестве добавок при создании глинистых материалов инженерных барьеров.

В отличие от других глинистых минералов особенности строения минералов группы смектита, в первую очередь монтмориллонита (относительно низкий заряд слоя и локализация изоморфных замещений в составе октаэдрических сеток), обеспечивают лабильность структуры, способность к внутрикристаллическому набуханию и к сорбции катионов и анионов на базальной поверхности и боковых сколах, высокую набухаемость, малые размеры кристаллитов, высокие значения удельной поверхности и показатели емкости катионного обмена. Таким образом, монтмориллонит и глинистые смеси с высоким его содержанием являются наилучшими компонентами для создания сорбционных, противодиффузионных и противомиграционных барьеров для обеспечения безопасности ПХ РАО, ПЗРО и других ОИАЭ.

Монтмориллонит является основным компонентом бентонитовых глин (70–99%), что и обеспечивает наибольшую перспективность их использования в атомной отрасли. Ранее считалось, что запасы бентонитовых глин в РФ низки [16], но это не соответствует действительности. В настоящий момент на рынке РФ доступно бентонитовое сырье с различными показателями свойств и содержанием монтмориллонита (главного фактора, определяющего свойства глин) от 60 до 99%. Основные характеристики месторождений глинистого сырья, в том числе бентонитового, будут приведены ниже.

Отдельно стоит отметить минералы слоистоленточного строения — палыгорскиты и сепиолиты, которые в силу высокой доли изоморфного замещения обладают довольно хорошими показателями сорбционной способности, а в силу особенностей строения характеризуются отсутствием внутрикристаллического набухания.

Сходство строения основного мотива всех глинистых минералов приводит к образованию в результате синтеза и преобразования в ходе геологических процессов многочисленных смешаннослойных минералов (ССМ), которые могут в значительной степени отличаться друг от друга составом и соотношением переслаивающихся пакетов и слоев, что неизменно приводит к большому разнообразию их свойств. В табл. 3 приведены лишь два примера смешаннослойных минералов — каолинит-смектиты и иллит-смектиты, которые наиболее распространены в составе осадочных пород и грунтов. При этом свойства смешаннослойных минералов будут определяться их составом и в первую очередь количеством и особенностями строения смектитовых пакетов (слоев).

Перспективными для использования в качестве компонентов инженерных барьеров также могут послужить палыгорскитовые глины, промышленные месторождения которых есть в РФ (Московская, Калужская и Архангельская области). Эти минералы отличаются высокой сорбционной способностью по отношению к тяжелым металлам и радионуклидам, но при этом не обладают высоким набуханием и могут потенциально использоваться в качестве добавок при создании сорбционных фильтрационных барьеров.

Итак, исходя из свойств глинистых минералов, наиболее перспективными для использования в качестве основного функционального компонента инженерных барьеров безопасности могут служить глинистые материалы с высоким содержанием монтмориллонита — бентонитовые глины. Дополнительно следует заметить, что глины обычно содержат органическое вещество, имеющее высокую сорбционную способность, соизмеримую с монтмориллонитами — 150–400 мг-экв/100 г, и высокую селективную сорбцию по отношению к ряду радионуклидов, например к урану. Однако присутствие органического вещества может сказываться негативно на сохранении свойств композиций на дальнюю перспективу за счет микробиологической и радиационной деструкции, что должно учитываться при проектировании.

Глинистые породы уже более 60 лет используются в качестве природных экранов — структур для создания пунктов окончательной изоляции РАО — по причине низких значений коэффициентов фильтрации и выраженной способности к задержке подвижных радионуклидов. Поэтому использование глинистых пород или материалов

на их основе позволяет рассматривать их как высокоэффективное сдерживающее средство для длительной изоляции РАО. В обводненных глинистых породах и ИИБ, в силу низких значений коэффициента фильтрации, основным механизмом миграции является диффузионный массоперенос. Изучение миграционных свойств бентонитовых экранов, в частности диффузионных, проводилось в ряде теоретических работ [17–19], связанных с обоснованием моделей диффузионного переноса с учетом физико-химических взаимодействий между минералами и подвижными мигрантами. Все модели, позволяющие прогнозировать миграцию радионуклидов, включают коэффициенты диффузии сорбируемых и несорбируемых веществ, а также параметры, отвечающие за физико-химическое взаимодействие между раствором и породой, которые во многом определяют надежность барьера. Поэтому модельные оценки надежности глинистых пород и ИИБ должны опираться на экспериментальные данные.

Существуют разные механизмы взаимодействия радионуклидов с глинистыми минералами в зависимости от химических свойств радионуклидов, типа глинистого минерала и условий среды. Можно выделить два основных механизма взаимодействия радионуклидов, образующих катионы в водных растворах.

Первый — это ионный обмен, при котором радионуклиды взаимодействуют с так называемыми ионообменными центрами, количество и тип которых, в свою очередь, напрямую зависят от структуры глинистого минерала. Общее количество ионообменных центров для данного образца определяет величину емкости катионного обмена, однако среди этих центров могут быть высоко- и низкоселективные по отношению к данному радионуклиду. Взаимодействие по механизму ионного обмена характерно для слабогидролизующих катионов, таких как щелочные и щелочноземельные элементы (^{90}Sr , ^{137}Cs и пр.). Для катионов актинидов и лантанидов взаимодействие по данному механизму характерно при относительно низкой минерализации раствора и низких значениях pH.

Вторым механизмом является взаимодействие с так называемыми краевыми центрами. Такое взаимодействие характеризуется образованием внутрисферных комплексов и, следовательно, низкой зависимостью от ионной силы раствора и значения pH. Взаимодействие по такому механизму протекает преимущественно для ионов актинидов. Важно отметить, что количество данных краевых центров не коррелирует с емкостью катионного обмена.

Таким образом, для подтверждения надежности использования глинистых материалов в ИИБ пунктов окончательной изоляции РАО необходимо проводить экспериментальные определения миграционных параметров, которые, как было

отмечено выше, включают в себя параметры, отвечающие за массоперенос через материалы барьера (коэффициент диффузии, коэффициент фильтрации, активная пористость), и параметры взаимодействия между подвижными радионуклидами и барьером (емкость катионного обмена, размер кристаллитов, удельная поверхность, концентрация различных типов сорбционных центров, коэффициенты сорбционного распределения). Экспериментальные определения параметров ионного обмена необходимо проводить совместно с определением параметров диффузионного переноса на образцах ненарушенной структуры или образцах ИИБ, т. к. существующие или сформированные агрегаты с внутридиффузионной кинетикой обмена в обычных статических экспериментах разрушаются, что повышает действующую (реальную) удельную поверхность обмена.

Барьерный материал может создаваться на основе одного или нескольких природных материалов с вводом различных добавок для достижения комплекса требуемых свойств. При создании ИИБ глинистые материалы могут использоваться как в виде комового сырья сразу после добычи на карьерах, так и после предварительной обработки — пластической деформации, сушки, измельчения, гранулирования, активации содой, для улучшения и приобретения дополнительных свойств согласно требованиям по гранулометрическому составу, насыпной плотности и т. д.

Наиболее эффективным материалом с полным комплексом противомиграционных и противофильтрационных свойств являются природные бентонитовые глины. Для улучшения экономической привлекательности при соблюдении необходимых требований безопасности на ряде объектов захоронения РАО могут использоваться смеси бентонита с песком (принятая в международной практике технология). В качестве «песка» для снижения стоимости барьерного материала могут использоваться местные полиминеральные глины не очень высокого качества, супеси, суглинки и почвы.

Месторождения глинистого сырья в РФ и странах СНГ

Запасы бентонитового сырья высокого качества, представленного в настоящий момент на российском рынке, достаточно высоки: более 10 млн т Na-Ca-бентонитов в республике Хакасия на трех месторождениях (10-й Хутор, Карасукское, Бентойское), 22 млн т Ca-Mg-бентонитов в Курганской области (Зырянское), более 9 млн т высококачественных Na-Ca-бентонитов в Республике Казахстан (месторожд. Таганское), 86 млн т природных Na-бентонитов в Азербайджанской Республике (Даш-Салахлинское). Качество бентонитового сырья обеспечивается содержанием и



Рис. 2. Обзорная карта минерально-сырьевой базы бентонитовых глин РФ и некоторых стран СНГ.
Список месторождений: 1 – Биклянское, Березовское и др. (Татарстан); 2 – Зырянское (Курганская обл.); 3 – 10-й Хутор (Хакасия); 4 – Ижбердинское, Сарайбашское и др. (Оренбургская обл.); 5 – Герпегежское, Нальчинское (Кабардино-Балкария); 6 – Калиново-Дашковское (Московская обл.); 7 – Никольское, Майдан-Бентонитовое, Подгорное (Воронежская обл.); 8 – Любинское (Омская обл.); 9 – Камалинское (Красноярский край); 10 – Тарасовское, Миллеровское (Ростовская обл.); 11 – Тихменевское, Вахрушевское, Макаровское (Сахалинская обл.); 12 – Зеркальное (Приморский край); 13 – Ургальское (Хабаровский край); 14 – Даш-Салахлинское (Республика Азербайджан); 15 – Таганское, Динозавровое (Республика Казахстан)

структурными особенностями основного полезного компонента — монтмориллонита [20]. Содержание монтмориллонита может варьировать в бентонитовых глинах от 65% (месторожд. Зырянское) до 75–80% (месторожд. 10-й Хутор и Даш-Салахлинское) и даже до 98% (отдельные рудопоявления месторожд.). Бентонитовое сырье добывается на карьерах селективно, что позволяет получать продукты с задаваемым качеством. На рис. 2 приведена карта с расположением основных месторождений, разведанных в настоящее время на территории РФ и стран СНГ [21–26]. Таким образом, можно с уверенностью утверждать, что запасов бентонитового сырья разного качества на рынке РФ с избытком хватит для решения всех вопросов по обращению с РАО.

Известно, что для удешевления барьерных материалов в качестве добавок могут использоваться природные или обогащенные материалы с высокими емкостными свойствами (вермикулиты, цеолиты), высокими плотностными свойствами для улучшения засыпки (каолины и каолиноподобные глины), а также полиминеральные глины (преимущественно относимые к категории огнеупорных). Месторождений вермикулита в России мало, и качество их по содержанию основного компонента невысокое. Наиболее известными являются месторождение Потанинское (Челябинская область) с балансовыми запасами категории С1 3,2 млн т и месторождение Татарское,

находящееся в Северо-Енисейском районе Красноярского края, с запасами категории С1 2,7 млн т и категории С2 1,7 млн т. При этом содержание вермикулита в руде составляет в среднем 45%, и этот показатель очень нестабилен ввиду специфических геологических условий формирования данного месторождения. Используемое в других отраслях вспучивание вермикулита (обжиг в специальных печах до температуры в 1000 °С) нельзя применять в случае использования в качестве материала барьерной смеси, так как вермикулит при подобной обработке теряет свои противомиграционные и противофильтрационные свойства в связи с необратимым изменением структуры минерала.

Каолиновые глины в настоящий момент используются в ряде российских проектов в качестве основного компонента барьерных смесей [6]. Однако при планировании изоляционных барьеров на будущих объектах надо учитывать, что эти глины имеют хорошую насыпную плотность, что выгодно сказывается при производстве барьерных смесей для вывода из эксплуатации объектов сложной конструкции (например, ПУГРов), но могут не обладать достаточными противомиграционными и противофильтрационными свойствами. Насыпная плотность барьерных смесей на основе бентонитовых глин может быть повышена за счет использования новых продуктов, которые будут доступны на

российском рынке в самой ближайшей перспективе. В первую очередь к таким материалам можно отнести использование компактированных гранул (пеллет) чистого бентонита или бентонита с разным содержанием песка, как это планируется и в некоторых европейских проектах [27]. В нашей стране активно разрабатываются несколько крупных и средних месторождений каолиновых глин в Челябинской области (наиболее известные: Кыштымское, Еленинское, Журавлиный Лог и Полетаевское) с суммарными балансовыми запасами категорий А+В+С1 в количестве 35 млн т и категории С2 — 20 млн т. Содержание полезного компонента (каолинита) составляет в них 65—85 %. Эти глины преимущественно используются для фаянсовой промышленности, отбеливания бумаги и т. д. и не являются дешевым глинистым сырьем.

Наконец, полиминеральные огнеупорные глины, как правило, являются в значительной степени полидисперсными и отличаются разнородным составом (могут присутствовать в разных соотношениях иллит, каолинит, хлорит и, как правило, невысокая примесь смектита), характеризуются невысокой сорбционной способностью и относительно высокими коэффициентами фильтрации. Встречаются полиминеральные глины довольно широко на территории европейской части страны и на территории Сибири, разрабатываются в случае доступной и экономически выгодной логистики, преимущественно используются в строительной промышленности, например для отсыпок дорог. Так, например, в Челябинской области разрабатываются 3 месторождения огнеупорных глин с суммарными балансовыми запасами категорий В+С1 в количестве 205 млн т, категории С2 — 224 млн т.

Таким образом, проведя анализ рынка глинистого сырья РФ, можно сделать вывод о доступности глинистых материалов и возможности разработки и создания барьерных смесей с заданными свойствами, которые при варьировании их состава будут наиболее экономически перспективными.

Перспективы разработки и создания глинистых материалов для инженерных барьеров

Ввиду того, что ОИАЭ (например, крупные объекты, такие как водоемы-хранилища ЖРО, объекты ЯТЦ, ПУГРы и др.) обладают различными характеристиками, должны разрабатываться рецептуры и вноситься добавления в уже существующие комплекты барьерных смесей. В настоящий момент особо актуальными представляются разработка и/или доработка для этих целей стандартизированных рецептур глинистых смесей, свойства которых будут протестированы в независимых лабораториях России и зарубежных стран, а также подтверждены в результате

совместных исследований ведущими международными экспертами.

Следует отметить, что при выводе из эксплуатации сложных объектов (ПУГР, водоемы-хранилища) в рамках ФЦП ЯРБ потребовалось решение целого ряда методических и научно-технических проблем, связанных с выбором наиболее подходящих барьерных материалов. В связи с этим, на основе всего накопленного опыта создания инженерных барьеров в Госкорпорации «Росатом» и специализированных институтах, в том числе Российской академии наук, а также имеющегося мирового опыта, необходимо разработать эффективные и экономически выгодные барьерные глинистые композиции для изоляции различных ОИАЭ.

Работы по объектам ядерного наследия должны быть четко ориентированы на решение существующих и будущих задач по обеспечению безопасности хранилищ/захоронений РАО. На основании требований безопасности того или иного объекта и системного подхода необходимо разработать состав глинистых материалов с заданными противифльтрационными и сорбционными свойствами.

Со времени начала в 1990 году работ по выводу из эксплуатации в значительной степени изменилась номенклатура материалов, которые в настоящий момент доступны на сырьевом рынке в РФ. Кроме порошковых есть возможность производить в промышленных масштабах технологически новые материалы — пеллеты, кирпичи и диски различных форм из уплотненного бентонита и бентонита с песком (рис. 3).

Использование смесей бентонитовых глин с песком позволяет создавать различные экономически обоснованные композиции компактированных глин заданных свойств. Применение гранул обосновывается в ряде европейских проектов ПГЗРО [27] и позволяет решить ряд сложных технологических вопросов. Пеллеты (гранулы) разного состава и размеров размещаются между упаковками с РАО, а также на контакте с горной породой и обладают множеством полезных свойств, в том числе высокой насыпной плотностью при высоких показателях сорбционных и противомиграционных свойств. В каждом отдельном случае могут задаваться размеры пеллет (гранул), кирпичей, дисков, соотношение бентонит — песок для достижения заданных свойств материалов.

Перспективными материалами для обеспечения безопасности ОИАЭ в качестве противифльтрационных экранов являются бентоматы (геотекстиль) (рис. 4), для которых также возможны вариации состава и толщины слоя бентонитовых гранул внутри материала для обеспечения необходимых заданных свойств [28].

Бентонитовый мат — рулонный геосинтетический материал, предназначенный для гидроизоляции, предотвращения проникновения в



Рис. 3. Примеры продукции, производимой на основе бентонитовых глин и бентонитовых глин с песком



Рис. 4. Схема строения бентомата (а), примеры его применения для создания изоляции мест хранения бытовых отходов (до укладки геотекстиля (б), после укладки геотекстиля (в)) и примеры укладки (г, д) и ручного монтажа (е) геотекстиля при создании противодиффузионных барьеров. Материалы предоставлены компанией ООО «Компания Бентонит»

почву и грунтовые воды загрязняющих веществ, а также защиты строительных конструкций от воздействия влаги. Принцип действия основан на свойстве монтмориллонита активно увеличиваться в объеме при гидратации. В ограниченном пространстве при гидратации частицы монтмориллонита образуют макромолекулярную структуру с характеристиками твердого тела — гель, обладающий низкой водопроницаемостью, упругостью и пластичностью. Бентонитовый мат представляет собой гибкий и прочный иллопробивной каркас из полипропиленовых волокон, внутри которого равномерно расположены гранулы натриевого бентонита.

Для проведения экспериментов по созданию барьерных смесей требуется создание научно-исследовательского центра (лаборатории) и привлечение промышленных партнеров вне корпорации Росатом для разработки технологической цепочки по измельчению, обогащению, смешиванию различных глинистых материалов и т. д. Для адекватной и независимой оценки

соответствия разрабатываемых смесей требованиям безопасности необходимо создание экспертного совета из независимых специалистов разных областей.

Заключение

Таким образом, исходя из вышесказанного, в настоящее время крайне актуально составить Программу по разработке и созданию композиций глинистых материалов для обеспечения безопасности различных ОИАЭ. Если десять лет назад постановка задачи о разработке отраслевой программы по глинистым материалам представлялась преждевременной, то сегодня она стоит особенно остро и может быть реализована в контексте решения проблемы обращения с РАО. В основу такой программы должны лечь:

- идентификация существующих ОИАЭ, требующих применения глинистых материалов;
- инвентаризация потенциальных объектов применения;

- анализ опыта реализации мероприятий;
- планы развития системы захоронения ФГУП «НО РАО» и неизбежность развертывания систем захоронения ОНРАО непосредственно на промышленных площадках предприятий;
- разработка требований к показателям свойств материалов в зависимости от их назначения и условий применения;
- разработка новых высокотехнологичных глинистых материалов совместно с производственными компаниями;
- оценка имеющихся ресурсов глинистого сырья и планы других отраслей промышленности и народного хозяйства, в том числе по обращению с высокотоксичными химическими и бытовыми отходами;
- анализ состава и свойств глинистых материалов и различных композиций на их основе, отражающих сорбционные, фильтрационные, диффузионные, миграционные, коллоидные и другие показатели, необходимые для оценки потенциального использования на ОИАЭ;
- анализ критических условий и заданных свойств глинистых материалов, которые позволяют обеспечивать безопасность радиационно опасных объектов;
- разработка необходимого комплекта отраслевых стандартов и, если потребуется, руководств по безопасности.

Программа по изучению глинистых материалов для повышения уровня безопасности ОИАЭ должна, как представляется на сегодняшний день, состоять из нескольких этапов и включать следующие направления исследований:

1. Оценка всего накопленного опыта применения глинистых материалов при строительстве и реализации экологических проектов.
2. Анализ состава и свойств глинистого сырья, доступного в Российской Федерации. В первую очередь должны исследоваться состав и основные свойства глин (фильтрационные, диффузионные, сорбционные, коллоидные и т. д.).
3. Исследование фундаментальных свойств глинистых материалов: поведение при сорбции катионов и анионов, давление набухания, процессы фильтрации и диффузии, устойчивость к воздействию агрессивных сред.
4. Исследование поведения радионуклидов в природных глинах и композициях: вопросы сорбции/десорбции, миграции радионуклидов, влияние состава и количества примесей на механизмы и параметры сорбции отдельных радионуклидов, особенности коллоидообразования различных глинистых материалов и его влияние на миграцию радионуклидов.
5. Разработка ключевых параметров структуры и свойств глинистых материалов, обеспечивающих их использование в качестве того или иного барьерного материала.
6. Экспериментальное и расчетное моделирование взаимодействия глинистых материалов

и других материалов барьеров ОИАЭ: взаимодействие с бетонами, цементами, сталью и пр. в условиях, близких к хранилищу/захоронению с учетом рН-Eh среды, температуры, давления и т. д.

7. Создание реестра природных глинистых материалов для дальнейшей разработки различных композиций на их основе.

8. Разработка композиций глинистых материалов с заданными свойствами. Разработка методических рекомендаций для проектных организаций с созданием технических условий по композициям глинистых материалов.

9. Создание экспертного совета для независимой оценки свойств глинистых композиций до и после применения в проектах по изоляции РАО.

Благодарности

При подготовке статьи использованы материалы ООО «Компания Бентонит». Результаты исследований по месторождениям глинистого сырья в РФ и странах СНГ подготовлены при поддержке проекта РНФ №16-17-10270.

Литература

1. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры / Р. М. Алексахин, Л. А. Булдаков, В. А. Губанов и др. / Под общ. ред. Л. А. Ильина и В. А. Губанова. — М.: ИздАТ, 2001. — 752 с.
2. Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Иванов А. Ю., Сахаров В. К., Полуниин К. Е. Лучшие зарубежные практики вывода из эксплуатации ядерных установок и реабилитации загрязненных территорий. Т. 1 / Под общ. ред. И. И. Линге и А. А. Абрамова. — М.: ИБРАЭ РАН, 2017. — 366 с.
3. Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Иванов А. Ю., Сахаров В. К., Полуниин К. Е. Лучшие зарубежные практики вывода из эксплуатации ядерных установок и реабилитации загрязненных территорий. Т. 2 / Под общ. ред. И. И. Линге и А. А. Абрамова. — М.: ИБРАЭ РАН, 2017. — 187 с.
4. Крюков О. В., Абрамов А. А. Итоги реализации ФЦП ЯРБ 2008–2015 и задачи на будущее // Сб. материалов юбилейной X Российской научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях». — Москва, Обнинск, 22–25 сентября 2015 г. — С. 24–35.
5. Захарова Е. В., Козырев А. С., Зубков А. А., Аверьянов Б. Ю. Создание внешних барьеров безопасности как способ предотвращения миграции радионуклидов из хранилищ РАО // Тематический сборник Росатома «Ядерная и радиационная безопасность России». 2012. Вып. 13. С. 133–139.
6. Павлюк А. О., Котляревский С. Г., Беспала Е. В., Захарова Е. В., Ермолаев В. М., Волкова А. Г. Опыт вывода из эксплуатации промышленного уран-графитового реактора ЭИ-2 АО «ОДЦ УГР» // Материалы V Международной конференции

- «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека». — Томск, 13—16 сентября 2016 г. — С. 508—512.
7. Особые радиоактивные отходы / А. А. Абрамов, А. Н. Дорофеев, Ж. В. Тяжкороб и др. / Под общ. ред. И. И. Линге. — М.: ООО «САМ полиграфист», 2015. — 240 с.
8. Guggenheim S., Adams J. M., Bain D. C., Bergaya F., Brigatti M. F., Drits V. A., Formoso M. L. L., Galan E., Kogure T. and Stanjek H. Summary of recommendations of Nomenclature Committees relevant to clay mineralogy: Report of the Association Internationale Pour L'etude des Argiles (AIPEA) nomenclature committee for 2006 // Clays and Clay Minerals. 2006. Vol. 54. No. 6. Pp. 761—772.
9. Wilson M. J. Rock-forming minerals. Sheet Silicates: Clays Minerals. — The Geological Society, London, 2013. — 724 pp.
10. Крупская В. В., Вирцава И. Принципы классификации и идентификации глинистых минералов // Материалы 3-й Российской школы по глинистым минералам «Argilla Studium-2014». — Москва, ИГЕМ РАН, 2014. — С. 56—65.
11. Крупская В. В., Закусин С. В. Определение состава глинистых минералов грунтов методом рентгеновской дифрактометрии // В кн.: Лабораторные работы по грунтоведению / Под ред. В. Т. Трофимова и В. А. Королева. Изд. 3-е, испр. и доп. — М.: КДУ, 2017. — С. 120—146.
12. Шлыков В. Г. Рентгеновский анализ минерального состава дисперсных грунтов. — М.: ГЕОС, 2006. — 176 с.
13. Дриц В. А., Коссовская А. Г. Глинистые минералы: смектиты, смешаннослойные образования. — М.: Наука, 1990. — 214 с.
14. Дриц В. А., Коссовская А. Г. Глинистые минералы: слюды, хлориты. — М.: Наука, 1991. — 176 с.
15. Ивановская Т. А., Зайцева Т. С., Звягина Б. Б., Сахаров Б. Б. Структурно-кристаллохимические особенности глобулярных слоистых силикатов глауконит-иллитового состава (поздний протерозой, Северная Сибирь) // Литология и полезные ископаемые. 2012. № 6. С. 562—584.
16. Захарова Е. В., Меняйло А. А., Андрющенко Н. Д. и др. Барьеры безопасности при выводе из эксплуатации и консервации радиационно опасных объектов // Материалы IV международной конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека». — Томск, 4—8 июня 2013 г. — С. 203—207.
17. Shackelford C. D., Moore S. M. Fickian diffusion of radionuclides for engineered containment barriers: Diffusion coefficients, porosities, and complicating issues // Engineering Geology. 2013. № 152. Pp. 133—147.
18. Montes-H, Marty N., Fritz B., Clement A., Michau N. Modelling of long-term diffusion-reaction in a bentonite barrier for radioactive waste confinement // Applied Clay Science. 2005, November. Vol. 30. Issues 3—4. Pp. 181—198.
19. Leroy P., Revil A., Coelho D. Diffusion of ionic species in bentonite // Journal of Colloid and Interface Science. 2006, April. Vol. 296. Issue 1. Pp. 248—255.
20. Наседкин В. В., Кваша Ф. С., Стаханов В. В. Бентонит в промышленности России / Под ред. Ю. Г. Сафонова. — Москва: ГЕОС, 2001. — 136 с.
21. Государственный баланс запасов РФ «Глины бентонитовые», 2015а.
22. Государственный баланс запасов РФ «Глины для буровых растворов», 2015б.
23. Государственный баланс запасов РФ «Формовочные материалы», 2015в.
24. British Geological Survey, 2015. — URL: <https://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/wms.cfc?method=searchWMS> (дата обращения 26.02.2018)
25. United States Geological Survey. Mineral YearBook (clay and shale) 2017. — URL: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/clays/myb1-2014-clays.pdf> (дата обращения 26.02.2018).
26. Industrial Minerals. — URL: <http://www.indmin.com/>.
27. Engineered Barrier Process Report for the Safety Assessment SR-PSU, August 2014: Technical Report TR-14-04. — SKB, Stockholm, Sweden. — 237 p.
28. Рыбальченко И. Л. Обращение с отходами очень низкого уровня активности. Шведский опыт. — СПб., 2009. — 36 с.

Информация об авторах:

Крупская Виктория Валерьевна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, (119017, Москва, Старомонетный пер., 35); старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, (115191, Москва, Б. Тульская ул., 52), e-mail: krupskaya@ruclay.com.

Бирюков Дмитрий Викторович, младший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Б. Тульская ул., 52), e-mail: biryukov@ibrae.ac.ru.

Белоусов Петр Евгеньевич, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, (119017, Москва, Старомонетный пер., 35), e-mail: pitbl@mail.ru.

Лехов Владимир Алексеевич, младший научный сотрудник, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, (119991, Москва, Ленинские горы, 1), e-mail: v.lekhov@gmail.com.

Романчук Анна Юрьевна, кандидат химических наук, научный сотрудник, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (119991, Москва, Ленинские горы, 1), e-mail: romanchuk.anna@gmail.com.

Калмыков Степан Николаевич, доктор химических наук, член-корреспондент РАН, и. о. декана химического факультета, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (119991, Москва, Ленинские горы, 1), e-mail: stepan@radio.chem.msu.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Крупская В. В., Бирюков Д. В., Белоусов П. Е., Лехов В. А., Романчук А. Ю., Калмыков С. Н. Применение природных глинистых материалов для повышения уровня ядерной и радиационной безопасности объектов ядерного наследия // Радиоактивные отходы. — 2018. — № 2 (3). — С. 30—43.

THE USE OF NATURAL CLAY MATERIALS TO INCREASE THE NUCLEAR AND RADIATION SAFETY LEVEL OF NUCLEAR LEGACY FACILITIES

Krupskaya V. V.^{1,2}, Biryukov D. V.¹, Belousov P. E.²,
Lekhov V. A.³, Romanchuk A. Yu.³, Kalmykov S. N.³

¹Nuclear Safety Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Institute of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Science, Moscow, Russia

³Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Article received 25 April 2018

The paper studies the composition, structure and properties of clay minerals being considered as engineered safety barriers components providing the isolation of nuclear legacy facilities. These considerations may provide a basis for the Program aimed at development and fabrication of clay mineral compositions to ensure the safety of different nuclear facilities.

Key words: *clay materials, nuclear legacy, isolation of radioactive waste, engineered barriers.*

Acknowledgements

The materials from the LLC “Bentonite Company” were used in the article. The research results on deposits of raw clays from the Russian Federation and CIS countries were obtained with the support from the RSF project no 16-17-10270.

References

1. Aleksakhin R. M., Buldakov L. A., Gubanov V. A. et al. *Kрупные радиационные аварии: последствия и защитные меры*. Ed. by L. A. Il'in and V. A. Gubanov. Moscow, IzdAT Publ, 2001. 752 p. (In Russian).
2. Tsebakovskaya N. S., Utkin S. S., Ivanov A. Yu., Sakharov V. K., Polunin K. Ye. *Luchshiy zarubezhnyye praktiki vyvoda iz ekspluatatsii yadernykh ustanovok i reabilitatsii zagryaznennykh territoriy*. Vol. 1. Ed. By I. I. Linge, A. A. Abramov. Moscow, IBRAE RAN Publ., 2017. 366p. (In Russian).
3. Tsebakovskaya N. S., Utkin S. S., Ivanov A. Yu., Sakharov V. K., Polunin K. Ye. *Luchshiy zarubezhnyye praktiki vyvoda iz ekspluatatsii yadernykh ustanovok i reabilitatsii zagryaznennykh territoriy*. Vol. 2. Ed. By I. I. Linge, A. A. Abramov. Moscow, IBRAE RAN Publ., 2017. 187 p. (In Russian).
4. Kryukov O. V., Abramov A. A. *Itogi realizatsii FTSP YARB 2008–2015 i zadachi na budushcheye. Sb. materialov yubileyной X Rossiyskoy nauchnoy konferentsii “Radiatsionnaya zashchita i radiatsionnaya bezopasnost' v yadernykh tekhnologiyakh”*. Moscow, Obninsk, 22–25 September 2015, pp. 24–35. (In Russian).
5. Zakharova Ye. V., Kozyrev A. S., Zubkov A. A., Aver'yanov B. Yu. *Sozdaniye vneshnikh bar'yerov bezopasnosti kak sposob predotvrashcheniya migratsii radionuklidov iz khranilishch RAO. Tematicheskiy sbornik Rosatoma “Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' Rossii”*, 2012, iss.13, pp. 133–139. (In Russian).
6. Pavlyuk A. O., Kotlyarevskiy S. G., Bepala Ye. V., Zakharova Ye. V., Yermolayev V. M., Volkova A. G. *Opyt vyvoda iz ekspluatatsii promyshlennogo uran-grafitovogo reaktora EI-2 AO “ODTS UGR”. Materialy V Mezhdunarodnoy konferentsii “Radioaktivnost' i radioaktivnyye elementy v srede obitaniya cheloveka”*. Tomsk, 13–16 September 2016, pp. 508–512. (In Russian).
7. Abramov A. A., Dorofeyev A. N., Tyazhkorob Zh. V. et al. *Osobyie radioaktivnyye otkhody*. Ed. by I. I. Linge. Moscow, OOO “SAM poligrafist” Publ., 2015. 240 p. (In Russian).
8. Guggenheim S., Adams J. M., Bain D. C., Bergaya F., Brigatti M. F., Drits V. A., Formoso M. L. L., Galan E., Kogure T. and Stanjek H. *Summary of recommendations of Nomenclature Committees relevant to clay mineralogy: Report of the Association Internationale Pour L'etude des Argiles (AIPEA) nomenclature committee for 2006. Clays and Clay Minerals*, 2006, vol. 54, no. 6, pp. 761–772.
9. Wilson M. J. *Rock-forming minerals. Sheet Silicates: Clays Minerals*. The Geological Society, London, 2013, 724 pp.
10. Krupskaya V. V., Virtsava I. *Printsipy klassifikatsii i identifikatsii glinistykh mineralov. Materialy*

- Tret'yey Rossiyskoy Shkoly po glinistym mineralam "Argilla Studium-2014"*. Moscow, IGEM RAN Publ., 2014, pp. 56–65. (In Russian).
11. Krupskaya V. V., Zakusin S. V. *Opredeleniye sostava glinistyykh mineralov gruntov metodom rentgenovskoy diffraktometrii*. In book: *Laboratornyye raboty po gruntovedeniyu*. Ed. by V. T. Trofimov, V. A. Korolev. Izd. 3-ye, ispr. i dop. Moscow, KDU Publ., 2017. Pp. 120–146. (In Russian).
 12. Shlykov V. G. *Rentgenovskiy analiz mineral'nogo sostava dispersnykh gruntov*. Moscow, GEOS Publ., 2006. 176 p. (In Russian).
 13. Drits V. A., Kossovskaya A. G. *Glinistyye mineraly: smektity, smeshanosloynnye obrazovaniya*. Moscow, Nauka Publ., 1990. 214 p. (In Russian).
 14. Drits V. A., Kossovskaya A. G. *Glinistyye mineraly: slyudy, khlority*. Moscow, Nauka Publ., 1991. 176 p. (In Russian).
 15. Ivanovskaya T. A., Zaytseva T. S., Zvyagina B. B., Sakharov B. B. *Strukturno-kristalloghimicheskiye osobennosti globulyarnyykh sloistyykh silikatov glaukonit-illitovogo sostava (pozdnii proterozoy, Severnaya Sibir')*. *Litologiya i poleznyye iskopayemye*, 2012, no. 6, pp. 562–584. (In Russian).
 16. Zakharova Ye. V., Menyaylo A. A., Andryushchenko N. D. et al. *Bar'yery bezopasnosti pri vyvode iz ekspluatatsii i konservatsii radiatsionno-opasnykh ob'yektov. Materialy IV mezhdunarodnoy konferentsii "Radioaktivnost' i radioaktivnyye elementy v srede obitaniya cheloveka"*. Tomsk, 4–8 June 2013, pp. 203–207. (In Russian).
 17. Shackelford C. D., Moore S. M. Fickian diffusion of radionuclides for engineered containment barriers: Diffusion coefficients, porosities, and complicating issues. *Engineering Geology*, 2013, vol. 152, pp. 133–147.
 18. Montes-H, N. Marty, B. Fritz, A. Clement, N. Michau. Modelling of long-term diffusion–reaction in a bentonite barrier for radioactive waste confinement. *Applied Clay Science*, November 2005, vol. 30, iss. 3–4, pp. 181–198.
 19. Leroy P., Revil A., Coelho D. Diffusion of ionic species in bentonite. *Journal of Colloid and Interface Science*, April 2006, vol. 296, iss. 1, pp. 248–255.
 20. Nasedkin V. V., Kvasha F. S., Stakhanov V. V. *Bentonit v promyshlenosti Rossii*. Ed. by YU. G. Safonov. Moscow, GEOS Publ., 2001. 136 p. (In Russian).
 21. *Gosudarstvennyy balans zapasov RF "Gliny bentonitovyye"*, 2015a. (In Russian).
 22. *Gosudarstvennyy balans zapasov RF "Gliny dlya burovyykh rastvorov"*, 2015b. (In Russian).
 23. *Gosudarstvennyy balans zapasov RF "Formovochnyye materialy"*, 2015v. (In Russian).
 24. *British Geological Survey*, 2015. Available at: <https://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/wms.cfc?method=searchWMS> (Accessed 26 February 2018).
 25. *United States Geological Survey*. Mineral Year-Book (clay and shale) 2017. Available at: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/clays/myb1-2014-clays.pdf> (Accessed 26 February 2018).
 26. *Industrial Minerals*. Available at: <http://www.indmin.com/>.
 27. *Engineered Barrier Process Report for the Safety Assessment SR-PSU*, August 2014. *Technical Report TR-14-04*. SKB, Stockholm, Sweden. 237 p.
 28. Rybal'chenko I. L. *Obrashcheniye s otkhodami ochen' nizkogo urovnya aktivnosti. Shvedskiy opyt*. SPb, 2009. 36 p. (In Russian).

Information about the authors

Krupskaya Victoria Valer'yevna, Candidate of Geologo-Mineralogical Sciences, Senior Researcher, Institute of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry Russian Academy of Sciences (35, Staromonetnyy per., Moscow, 119017, Russia); Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: krupskaya@ruclay.com.

Biryukov Dmitry Viktorovich, Junior researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: biryukov@ibrae.ac.ru.

Belousov Petr Yevgen'yevich, Candidate of Geologo-Mineralogical Sciences, Researcher, Institute of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences (35, Staromonetnyy per., Moscow, 119017, Russia), e-mail: pitbl@mail.ru.

Lekhov Vladimir Alekseyevich, Junior researcher, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskiye gory, Moscow, 119991, Russia), e-mail: v.lekhov@gmail.com.

Romanchuk Anna Yur'yevna, Candidate of Chemical Sciences, Researcher, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskiye gory, Moscow, 119991, Russia), e-mail: romanchuk.anna@gmail.com.

Kalmykov Stepan Nikolayevich, Doctor of Chemical Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Acting Dean of chemical faculty. Lomonosov Moscow State University (1, Leninskiye gory, Moscow, 119991, Russia), e-mail: stepan@radio.chem.msu.ru.

Bibliographic description

Krupskaya V. V., Biryukov D. V., Belousov P. E., Lekhov V. A., Romanchuk A. Yu., Kalmykov S. N. The use of natural clay materials to increase the nuclear and radiation safety level of nuclear legacy facilities. *Radioactive Waste*, 2018, no. 2 (3), pp. 30–43. (In Russian).