

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ В РАЗРАБОТКАХ И ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГЛИНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В КАЧЕСТВЕ ИНЖЕНЕРНЫХ БАРЬЕРОВ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОБЪЕКТАХ КОНСЕРВАЦИИ И ЗАХОРОНЕНИЯ РАО В РОССИИ

О. А. Ильина¹, В. В. Крупская^{2,3}, С. Е. Винокуров⁴, С. Н. Калмыков⁵

¹ООО «Компания Бентонит», Москва

²Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва

³Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

⁴Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН, Москва

⁵Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва

Статья поступила в редакцию 29 октября 2019 г.

В статье приведены данные выполняемых в России научно-исследовательских работ по определению барьерных свойств глиняного минерального сырья и разработке рекомендаций для выбора материалов инженерных барьеров безопасности при проектировании и строительстве пунктов консервации и захоронения РАО. Приведены рекомендации по совершенствованию системы управления НИОКР и повышению их прикладной значимости для обеспечения безопасности объектов консервации и захоронения РАО.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, барьерные материалы, глинистые материалы, захоронение радиоактивных отходов, инженерные барьеры безопасности, исследования, обоснование безопасности, проектирование ПЗРО.

Введение

Реализация Федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016—2020 годы и на период до 2030 года» связана со строительством и организацией большого числа пунктов захоронения и консервации радиоактивных отходов (РАО) различных классов. Целью создания этих объектов является минимизация вредного и опасного влияния размещенных в них РАО на человека и окружающую среду в долгосрочной

перспективе. Значительная роль при решении этой проблемы отводится инженерным барьерам безопасности (ИББ), материалы и конструкция которых должны обладать свойствами, обеспечивающими безопасные условия захоронения РАО на долгосрочную перспективу (сотни и тысячи лет), — в течение этого времени их свойства и характеристики должны быть надежно предсказуемы и поддаваться оценке. Выбор материала ИББ — это результат научных

исследований с целью обоснования возможности достижения требуемых характеристик и получения параметров их изменения для создания моделей объектов, расчета сценариев развития событий, обоснования долговременной безопасности пункта захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) на всей продолжительности его жизненного цикла.

Глинистые материалы, благодаря их уникальным свойствам, являются чрезвычайно перспективными для применения в качестве материалов ИББ [1]. При этом, несмотря на широкое распространение глин в природе, выбор глинистых материалов для инженерных барьеров еще на проектной стадии должен обязательно включать аналитическую работу по оценке и отбору месторождений, подходящих по запасам и логистике, а также корректный отбор образцов этих материалов. В настоящее время организациями, входящим в контур Госкорпорации «Росатом», проводятся различные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР), направленные на изучение свойств и применение глин в условиях различных объектов использования атомной энергии (ОИАЭ). Очевидно, что при отсутствии такой аналитической проработки, в результате таких работ могут быть предложены недостаточно проработанные и обоснованные проектные решения, а в проекты будут заложены характеристики материалов, которые не могут быть достигнуты или проконтролированы. Таким образом, неизбежный излишний консерватизм проектных решений в конечном счете приведет к удорожанию создаваемого объекта. Проектировщик зачастую не имеет объективной информации о характеристиках применяемых материалов, поэтому при расчетах использует литературные данные, не всегда отражающие свойства заданного материала. В результате подрядчик, не получивший в проектной документации требований к материалу ИББ, при закупке будет ориентироваться на поставщиков, предложивших более низкие цены на материал. Данная проблема, на которую также обращали внимание авторы работы [2], является комплексной и обусловлена несовершенством нормативно-технической базы по применению материалов на основе глин на объектах атомной отрасли.

В настоящей статье, направленной на систематизацию имеющихся данных по разработке и испытаниям глинистых материалов, суммированы сведения о проводимых НИОКР, сведения

о создаваемых ПЗРО, а также опыта вывода из эксплуатации промышленных уран-графитовых реакторов (ПУГР).

Сведения о НИОКР по разработке барьерных материалов на основе глин

В настоящее время АО «СХК» по заказу проектного офиса «Формирование единой государственной системы обращения с РАО» Госкорпорации «Росатом» выполняет НИОКР на тему «Исследование барьерных свойств глиняного минерального сырья и разработка рекомендаций для материалов инженерных барьеров безопасности пунктов консервации и ПЗРО» [3]. Работы включают лабораторные и стендовые испытания, в том числе подготовку образцов дисперсных материалов из природного сырья и определение их состава и первичных характеристик, определение компрессионных свойств и подвижности сухих образцов, водонепроницаемости образцов при низком гидравлическом градиенте, компрессионно-фильтрационных свойств образцов в водонасыщенном состоянии, определение диффузионных свойств образцов, их способности к коллоидообразованию, расчет устойчивости главных минералов глиняных барьерных материалов. Окончание работ планируется 30.11.2020. Для проведения исследований исполнитель выбрал образцы глин, указанные в табл. 1, а также 8 других каолин-бентонитовых смесей глин.

По итогам работ должны быть определены перечень и значения параметров, предъявляемых к различным типам барьерных материалов, используемых при строительстве и эксплуатации пунктов приповерхностного захоронения (ППЗРО) для РАО 3 и 4 классов; пунктов консервации ПУГР на АО «СХК», ФГУП ПО «Маяк», ФГУП «ГХК»; пункта глубинного захоронения (ПГЗРО) для РАО 1 и 2 классов в Нижнеканском массиве, т. е. для всех категорий объектов захоронения РАО (рис. 1). При этом следует особо отметить, что по проектам ППЗРО прошли общественные слушания и проведена государственная экологическая экспертиза [4], а строительство объектов планируется начать в 2019 году [5]. В 2013–2015 гг. был выведен из эксплуатации ПУГР ЭИ-2 АО «СХК» методом захоронения на месте с использованием композиции на основе природных глин, и в 2020 году планируется осуществить захоронение еще одного ПУГР ФГУП «ГХК» [6]. Ниже подробнее рассмотрены каждая из категорий объектов консервации и захоронения РАО и барьерные материалы, которые на них применяются.

Таблица 1. Образцы глин для исследований в рамках НИОКР, выполняемых АО «СХК» [3]

| Образцы глин | Примечание (по материалам реестров Росгеолфонда) |
|---|--|
| Каолин, Кантатское месторождение | Лицензия на разведку и добычу огнеупорных и тугоплавких глин участка 2 принадлежит ООО «Туран» |
| Каолин, Кампановское месторождение | Лицензия на разведку и добычу каолина и тугоплавких глин принадлежит ООО «Силит» |
| Тугоплавкая глина, Кампановское месторождение | |
| Бентонит, Камалинское месторождение | Право пользования лицензией в настоящее время прекращено |
| Бентонит, 10-й Хутор | Лицензия на разведку и добычу полезных ископаемых принадлежит ООО «Бентонит Хакасии» |
| Флогопит (в смеси), месторождение Татарское | Лицензия на геологическое изучение, разведку и добычу вермикулитовых руд северного участка первой рудной зоны Татарского фосфатно-ниобиевого месторождения принадлежит ООО «Группа Магnezит» |
| Смесь глин (каолин, бентонит, вермикулит) | Использована при захоронении ПУГР ЭИ-2 АО «СХК» |
| Смесь глин (каолин, бентонит) | Использована при засыпке межконтейнерного пространства Новоуральского ППЗРО ФГУП «НО РАО» |



Рис. 1. Карта расположения действующих и проектируемых ПЗРО [4]

Пункты приповерхностного захоронения РАО 3, 4 класса

Заказчиком проектирования, строительства и эксплуатирующей организацией пунктов окончательной изоляции РАО 3, 4 класса опасности является ФГУП «НО РАО». Одним из документов, регулирующих строительство ПЗРО, является НП-055-14 [7], в котором в качестве основного определен принцип многобарьерности. Безопасность ПЗРО обеспечивается за счет последовательной реализации концепции глубоководной защиты, основанной на применении системы физических барьеров на пути распространения ионизирующего излучения и радиоактивных веществ в окружающую среду. Функциями ИББ, согласно НП-055-14, являются ограничение контакта упаковок РАО с

природными водами (противофильтрационные свойства) и ограничение распространения радионуклидов во вмещающие породы (противомиграционные свойства). Обычно конструкция ПЗРО включает 5 барьеров безопасности:

- первый барьер — упаковка РАО — матричный материал, включающий РАО, балластный заполнитель, контейнер;
- второй барьер — буферный материал, заполняющий свободное пространство в отсеках;
- третий барьер — материалы стен и перекрытий сооружений для размещения РАО;
- четвертый барьер — подстилающий изоляционный экран по периметру (стены, днище, перекрытие) сооружений;
- пятый барьер — покрывающий гидроизолирующий экран, создаваемый при закрытии хранилища.

Следует отметить, что в НП-055-14 и других нормативных документах нет конкретных требований и рекомендаций по выбору барьерных материалов и их характеристикам. Таким образом, выбор конкретных материалов и установление требований и характеристик, предъявляемых к ним, должен осуществляться на стадии проектирования. Рассмотрим на примерах, как был осуществлен выбор барьерных материалов с учетом этих требований. В открытом доступе на официальных ресурсах находятся материалы обоснования лицензий (МОЛ) на строительство и эксплуатацию ППЗРО, включая материалы оценки воздействия на окружающую среду [8–11].

ППЗРО для РАО 3 и 4 классов в районе г. Новоуральск Свердловской области

Первая очередь ППЗРО в районе г. Новоуральск эксплуатируется с 2016 года (10-я карта), вторая очередь (карты 11–13) начала строиться в 2018 году [4]. В МОЛ на эксплуатацию первой очереди [8] указано, что первичная консервация путем заполнения свободного пространства между упаковками РАО (второй инженерный барьер) осуществляется глинопорошком — бентонитом по ГОСТ 28177-89 [12]. Данный стандарт распространяется на бентонитовые формовочные глины, применяемые в литейном производстве в качестве минеральных связующих в составах формовочных и стержневых смесей и противопожарных покрытий. Согласно стандарту массовая доля монтмориллонита, как основного минерала бентонитовой глины, должна составлять не менее 30%. При этом в технических требованиях МОЛ указано содержание монтмориллонита не менее 30%, каолинита — не менее 50%, т. е. подразумевается использование смеси двух глин, что не предусмотрено ГОСТ 28177-89. Для строящейся второй очереди хранилища заполнение свободного пространства между контейнерами с РАО в проекте предусмотрено заливкой цементно-бентонитовой смесью [9]. Этот способ вызывает опасения в связи с низкой стойкостью предлагаемого материала к процессам физико-химического выщелачивания грунтовыми водами, а также воздействию температурных перепадов, возможных при возникновении промерзания и протаивания, и, как следствие, быстрой потерей им изолирующих свойств. Для второй очереди в МОЛ также указан четвертый барьер — подстилающий слой — глиняный экран и бентонитовые маты по периметру (стены, днище) карт ПЗРО. Глиняный экран по периметру выполняет гидроизолирующую (в течение не менее 500 лет) и сорбционную функции. Бентонитовые маты

выполняют изолирующую функцию в течение неограниченного срока при сохранении ими целостности. Характеристики глины и бентонитовых матов, которые необходимы для обеспечения заявленного срока службы, не указаны. Пятый инженерный барьер — покрывающий экран, создаваемый после заполнения хранилища при его закрытии, — состоит из глины с коэффициентом фильтрации не более 10^{-5} м/сут, дренажного слоя из гравийно-песчаной смеси, защитного слоя из дробленого камня и верхнего защитного слоя из суглинка с почвенно-растительным покровом [9]. Требования к природе или минеральному составу глины, толщине слоя и коэффициенту уплотнения также не указаны. Стоит отметить, что при использовании таких важных показателей изоляционных свойств, как коэффициенты фильтрации, необходимо указывать, при каком уплотнении получали (или требуется получить) данные значения, так как один и тот же материал будет обладать различной гидроизоляцией при различных уплотнениях. В большинстве запросов это не учитывается.

ППЗРО для РАО 3 и 4 классов в ЗАТО Северск Томской области

В МОЛ на размещение и сооружение приповерхностного пункта захоронения твердых радиоактивных отходов 3 и 4 класса в качестве четвертого инженерного барьера — подстилающего слоя — указан глиняный «замок» из жирной мятой глины по периметру (стены, днище) сооружений [10]. При этом характеристика «жирной мятой глины» в документе не приводится, как и нет требований к ее показателям качества. В качестве 2-го инженерного барьера, предназначенного для заполнения свободного пространства в отсеках, указан буферный материал — глинопорошок марки СБМК (смесь барьерная механоактивированная композиционная, ТУ 5729-002-3045284-2013), состоящий из каолина, бентонита и вермикулита. СБМК использовалась при выводе из эксплуатации ПУТР ЭИ-2 на СХК. Покрывающий экран состоит из следующих слоев: бентонитовый мат, песок, слой уплотненной глины или суглинка, еще один слой бентонитового мата, дренажный слой, почвенно-растительный слой.

ППЗРО для РАО 3 и 4 классов в ЗАТО Озерск Челябинской области

Этот ППЗРО имеет такую же модульную конструкцию, как и в ЗАТО Северск [11] (рис. 2). В качестве подстилающего слоя в проекте указан глиняный экран и бентонитовые маты по периметру стен, днища и перекрытий ППЗРО. Материал для

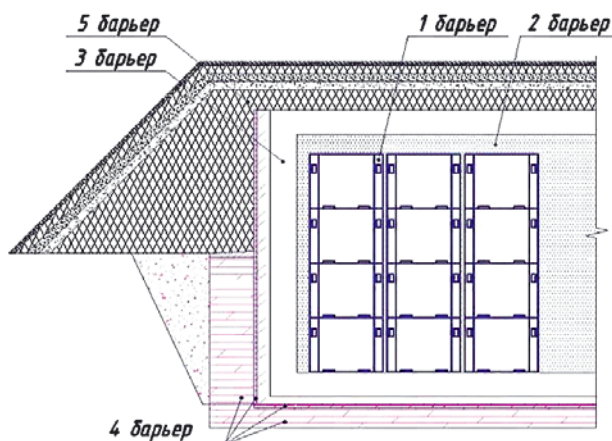


Рис. 2. Система инженерных барьеров безопасности ППЗРО в Озерске. Источник: АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон» – «УПИИ ВНИПИЭТ» [10]

выполнения барьера 2 — буферный материал засыпки, заполняющий свободное пространство в отсеках, — выбран на основе глиняного порошка

или гранул. Покрывающий экран состоит, как в проекте ППЗРО в Новоуральске, из глинистого гидроизолирующего слоя — глиняного «замка» толщиной 1 м, дренажного слоя из гравийно-песчаной смеси, защитного слоя из дробленого камня, защитного слоя из местного грунта и почвенно-растительного покрова.

Сведения о типах глинистых материалов, используемых в качестве инженерных барьеров безопасности в вышеуказанных проектах ППЗРО, приведены в табл. 2. Из этой таблицы видно, что в проектной документации на сооружение ППЗРО не всегда содержатся требования к глинистым материалам, используемым в составе ИББ. Часто указываются только качественные характеристики или название минерала, что, очевидно, не является достаточным для того, чтобы корректно сформировать техническое задание на закупку барьерного материала и проводить его входной контроль.

Таблица 2. Выбор глин в проектах ППЗРО

| | Новоуральск 1 очередь [8] | Новоуральск 2 очередь [9] | Озерск [11] | Северск [10] |
|---|---------------------------|--|------------------------------------|--|
| ИБ 2: Буферный материал, заполняющий свободное пространство в отсеках | Смесь бентонита и каолина | Цементно-бентонитовая смесь (заливка) | Глинопорошок или гранулы | Смесь каолина, бентонита, вермикулита |
| ИБ 4: Подстилающий экран | Нет данных | Глиняный экран и бентонитовые маты | Глиняный экран и бентонитовые маты | Жирная мятая глина |
| ИБ 5: Покрывающий экран | | Глина Песчано-гравийная смесь Дробленый камень Почвенно-растительный покров | | Бентонитовые маты Песок Слой уплотненной глины или суглинка Бентонитовые маты Дренажный слой Почвенно-растительный слой |

Пункт глубинного захоронения РАО 1, 2 классов. Вывод из эксплуатации ПУГРов

В отличие от вышерассмотренных ППЗРО, строительство которых осуществляется или начнется уже в ближайшее время, исследования и сооружение пункта глубинного захоронения РАО 1 и 2 классов опасности будут проведены в течение двух десятилетий. Вопросы научно-технического сопровождения создания ППЗРО консолидированы в ИБРАЭ РАН в формате стратегического мастер-плана (СМП НКМ) [13]. Программа экспериментов в создаваемой подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) включает 7 научных направлений, которые вместе с ИБРАЭ РАН будут выполнять ИФХЭ РАН, ИГЕМ РАН, НИТУ МИСиС и Геофизический центр РАН. Лабораторные эксперименты в этих организациях начались в 2019 году, эксперименты в ПИЛ

частично ведутся при ее строительстве, остальные начнутся после 2025 года. В качестве материалов ИББ будут испытываться различные типы бентонитов, альтернативные материалы, барьерные смеси, смеси бентонит-песок и т. д. Отметим, что каждая организация-исполнитель сама выбирает, какие материалы использовать при испытаниях.

При выводе из эксплуатации ПУГР ЭИ-2 АО «СХК» в 2013—2015 гг. применялась технология засыпки шахты реактора и приреакторных пространств барьерной смесью на основе каолина Кампановского месторождения (80—90%) (см. табл. 1) [14]. Обращаем внимание на то, что данный каолин АО «ПО «ЭХЗ» ранее планировал использовать при производстве фарфоровых изделий, но по качественным характеристикам он подошел только для тугоплавких материалов и футеровочных кирпичей [15].

Сравнение каолиновых и бентонитовых глин

В настоящее время почти все реализуемые в мире стратегии захоронения РАО включают использование бентонитовых глин в качестве буферов, уплотнений или засыпок [16].

По результатам российских и зарубежных исследований [17–29] можно сделать вывод, что бентонит по своим противодиффузионным и противомиграционным свойствам существенно превосходит каолин. Основные характеристики для сравнения этих глин приведены в табл. 3.

Таблица 3. Сравнение свойств бентонитовой и каолиновой глин

| Каолиновая глина | Бентонитовая глина |
|--|---|
| Структура минерала [18–22] (рис. 3) | |
| Природный слоистый алюмосиликат, в основе строения которого лежит слой 1:1, состоящий из одной сетки кремний-кислородных тетраэдров и соединенной с ней алюминий-гидроксил-кислородной сетки октаэдров. За счет почти нулевого заряда слоя, а также возникновения сильных электростатических и водородных связей решетка каолинита становится жесткой, что препятствует формированию хороших адсорбционных свойств | Природный слоистый алюмосиликат, в основе строения которого лежит слой 2:1, состоящий из двух тетраэдрических сеток и одной октаэдрической сетки, заключенной между ними. Благодаря изоморфным замещениям в структуре, преимущественно октаэдрических сеток, возникает слоевой заряд порядка 0,4–0,6 эл. ед., который нейтрализуется благодаря вхождению обменных межслоевых катионов (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} и др.) обычно в гидратированной форме [18–20], что обеспечивает лабильность структуры и делает доступными для адсорбции внешние и внутренние поверхности в кристаллитах. Подобные особенности строения монтмориллонитов определяют такие специфические свойства бентонитовых глин, как высокая сорбционная способность, в том числе к тяжелым металлам, изотопам цезия, плутония и другим, которые содержатся в радиоактивных отходах |
| Коэффициент фильтрации, м/сут | |
| 10^{-4} – 10^{-3} (без указания методики испытаний и плотности образца) [23]; $4 \cdot 10^{-6}$ (испытания по методу компрессионного сжатия для грунтов по ГОСТ 12248-2010) [25] | 10^{-5} – 10^{-4} (без указания методики испытаний и плотности образца) [23]; менее $4 \cdot 10^{-6}$ (без указания методики испытаний и плотности образца) [24]; $7 \cdot 10^{-7}$ (испытания по методу компрессионного сжатия для грунтов по ГОСТ 12248-2010) [25]; 10^{-10} – 10^{-9} (сильно уплотненные высококачественные бентониты, испытания по ASTM D 5084-03) [26] |
| Способность к набуханию, % | |
| 3–5 [23] | 40–200 и более [23] |
| Катионно-обменная емкость, мг-экв/100 г | |
| 2–10 [27] | 80–150 [21, 22, 27] |
| Коэффициент распределения, $\text{см}^3/\text{г}$ | |
| Sr, Cs, Pu, Am – 10^3 ; Np, U – 10^2 [23] | Sr, Cs, Pu, Am – 10^2 – 10^3 [23]; U – 10^2 (ср. знач.) [28]; Np – 10^3 [29] |

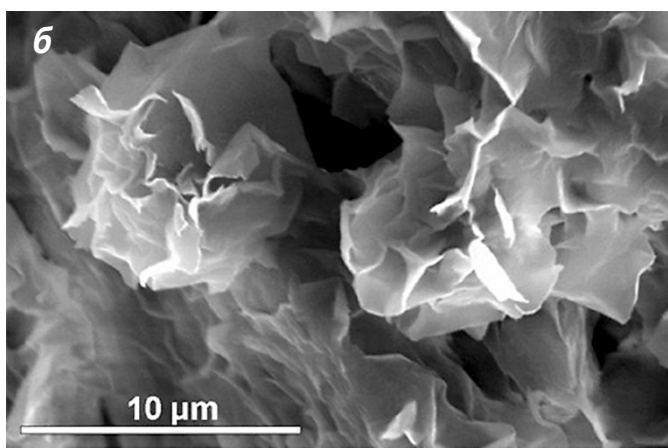


Рис. 3. Микрофотографии каолинита (а) и монтмориллонита (б) [30]

При этом авторы работы [23] делают вывод о том, что запасы бентонита ограничены, а стоимость его высока по сравнению с каолином. С другой стороны, данный вывод идет вразрез с мнением других специалистов [1, 31]. Действительно, в настоящий момент на рынке РФ

доступно бентонитовое сырье с различными показателями свойств. Ориентировочные запасы бентонитовой глины в России составляют 189 млн т по категории А+В+С1 и 146 млн т по категории С2. Суммарная добыча за 2017 год составила более 700 тыс. т [31].

По результатам реализации проекта с ЭИ-2 официальные данные мониторинга и контроля состояния созданного хранилища признаны удовлетворительными и были доложены на сессии МАГАТЭ, где получили положительную оценку международного сообщества. Ряд стран заинтересовался технологией использования природных барьерных материалов при консервации ПУТРов. Но в настоящее время лицензия на разведку и добычу каолина и тугоплавких глин Кампановского месторождения не принадлежит структуре компаний «Росатома», поэтому АО «СХК» рассматривает в качестве компонента барьера безопасности местные глины, залегающие на территории комбината. Так, в 2019 году АО «СХК» выступил заказчиком НИР «Разработка технологии получения барьерных материалов на основе глинистых пород, залегающих на территории АО «СХК» [32]. По результатам НИР планируется разработать барьерные материалы на основе местных глин с введением добавок промышленно выпускаемых подготовленных глин, глинистых смесей и добавок отходов производства СХК. Можно предположить, что комбинат будет использовать наработки данного проекта при создании хранилища особых РАО при выводе из эксплуатации ПУТР АДЭ-4, АДЭ-5; консервации пульпохранилищ Пх-1, Пх-2 и наземных хранилищ ТРО на площадке 16 химико-металлургического завода; создании пунктов консервации особых радиоактивных отходов М1, М2.

Кроме того, в соответствии с проектом вывода из эксплуатации корпуса 4 (здание 804) АО «Ангарский электролизный химический комбинат» планируется произвести обратную засыпку его котлована с захоронением в нем очень низкоактивных РАО. В техническом задании [33] на закупку материала засыпки указан глинистый грунт, супесь в соответствии с ГОСТ 25100-2011 [34]. В то же время технические требования к грунту отсутствуют, как и нет обоснования его эффективности и надежности в качестве противодиффузионного и противомиграционного ИББ.

В течение 2018–2020 гг. ФГУП «ГХК» реализует проект по выводу из эксплуатации ПУТР АД [6]. Заполнение шахты реактора производится барьерным материалом похожего состава из каолина, вермикулита и бентонита, как было сделано в АО «СХК» [35]. С 2021 года в АО «СХК» планируется вывод из эксплуатации ПУТР АДЭ-4 и АДЭ-5, а после завершения этих работ еще 2 реактора АДЭ-2 и И-1.

Еще одну НИР «Определение параметров миграции радионуклидов в материалах барьеров безопасности и вмещающих горных породах после выщелачивания компонентов фосфатного

стекла в условиях ПГЗРО» выполняет ИФХЭ РАН по контракту с Госкорпорацией «Росатом» [36]. Сроки выполнения работ: с 15.05.2019 по 30.11.2020. В качестве барьерных материалов в работе должны быть использованы различные по минеральному составу бентониты из двух месторождений: Камалинское (Красноярский край) и 10-й Хутор (Республика Хакасия) (рис. 4).



Рис. 4. Месторождение бентонита 10-й Хутор, Хакасия. Источник: ООО «Бентонит Хакасии»

Таким образом, как показано на рассмотренных выше примерах, для различных объектов консервации и захоронения РАО проектная и эксплуатирующая организация самостоятельно осуществляет выбор состава барьерного материала, опираясь на собственную экспертизу, не принимая во внимание НИОКР по заказу Росатома (см. раздел «Сведения о НИОКР по разработке барьерных материалов на основе глин»). Исследования проводятся независимо и на различных образцах, выбор которых никак не регламентируется и не является результатом аналитического исследования месторождений и критического литературного обзора уже имеющихся опубликованных результатов исследований. Очевидные риски таких работ заключаются в том, что в результате могут быть получены лишь отдельные данные по образцам глин различного минерального состава и с разным набором изолирующих свойств, которые будет затруднительно экстраполировать на промышленно разрабатываемые месторождения и вывести закономерности для создания нормативно-технической документации для проектирования и эксплуатации ИББ.

Рекомендации к проведению последующих НИОКР

Госкорпорация «Росатом» поставила целью решить задачи по определению перечня и значений параметров, предъявляемых к различным

типам барьерных материалов для пунктов консервации ППЗРО, то есть определить нормативные требования к барьерным материалам и дать ответ, какие глинистые материалы или их смеси подходят для обеспечения этих нормативных требований (см. раздел «Сведения о НИОКР по разработке барьерных материалов на основе глин»). Однако выбор образцов глин, включенных в НИОКР АО «СХК», обусловлен, очевидно, опытом выполнения работ прошлых лет без подготовки аналитического обзора рынка глинистого сырья, оценки его качества и характеристик на основе литературных данных и учета передового российского и международного опыта по исследованиям и применению глинистых материалов. Выбранные месторождения каолина и бентонита локализованы в Красноярском крае, а другие перспективные месторождения глин в других регионах не рассматривались, хотя они имеют логистическое преимущество по отношению к объектам консервации и захоронения РАО, находящимся в центральном регионе. Как показано в табл. 3, противотрационные и противомиграционные свойства бентонита значительно превосходят свойства каолиновых глин. Таким образом, по мнению авторов, задачами дополнительных исследований должно стать уточнение свойств бентонитовой глины с учетом общемировой практики создания ИББ и условий выбираемых мест захоронения и характеристик упаковок РАО.

Кроме того, как было показано выше, эксплуатирующие предприятия выбирают материал ИББ самостоятельно, исходя из его стоимости или географической доступности. В результате такого подхода значительно затруднена обобщающая аналитическая работа по оценке опыта и эффективности применения различных глинистых материалов российского происхождения. Следует обратить особое внимание на то, что научные группы институтов РАН (в том числе ИБРАЭ РАН, ИГЕМ РАН и ГЕОХИ РАН) и ведущих вузов (например, МГУ им. М. В. Ломоносова и РХТУ им. Д. И. Менделеева) проводят фундаментальные и прикладные исследования глинистых минералов и изучают их поведение в условиях консервации и захоронения РАО. Результаты этих работ регулярно публикуются в научной периодике и представляются на российских и международных конференциях. Именно такая мировая практика позволяет заказчикам находить требуемых специалистов и узнавать актуальные результаты исследований, а научному сообществу — поддерживать дискуссию и рассматривать различные точки зрения. Выбор организации-исполнителя для выполнения

исследований и разработок в рамках данной специальной тематики следует проводить прежде всего с учетом компетенции научных сотрудников, оснащенности современным оборудованием, научной активности организации и цитируемости научных трудов их сотрудников в международных базах данных.

Технологии и оборудование для проведения фундаментальных и прикладных исследований развиваются с каждым годом. Внедрение аппаратных и программных инструментов для научных исследований, информационных технологий, сбор и анализ больших массивов данных открывают возможности цифровых НИОКР для решения междисциплинарных проблем, к которым, безусловно, относится проблема безопасного обращения с РАО. При выборе исполнителя НИОКР по проблеме создания эффективных ИББ, которые связаны с прогнозированием и обоснованием безопасности захоронения РАО на срок до 10 000 лет, необходимо сопоставлять способы измерения, точность, возможность влияния человеческого фактора на экспериментальные данные с точностью дальнейшего анализа и построения моделей. При планировании таких исследований, которые требуются для обоснования выбора барьерного материала, следует делать ставку на научные коллективы, которые используют передовое оборудование и методики и могут давать результаты в виде массива данных в формате, подходящем для дальнейших расчетов и прогнозирования с помощью программных комплексов.

Авторы уверены, что для координирования таких масштабных НИОКР необходим центр компетенций или консорциум специалистов. Информационные технологии могут существенно облегчить управление НИОКР, если объединить научные организации и организации в контуре Росатома на единой платформе управления исследованиями и разработками. Использование современных информационных технологий позволит создать банк данных о знаниях и компетенциях научных организаций и эффективно управлять выполняемыми ими проектами. Модульная архитектура платформы позволит собирать системы для выполнения НИОКР, подключать и использовать компоненты для работы над проектом.

Функции, которые может выполнять центр компетенций:

1. Согласование программ и методик испытаний с целью обоснования необходимости и достаточности свойств того или иного глинистого материала с учетом гипотез, выстраиваемых на основании проектных решений по упаковкам

РАО, прогноза поведения РАО и упаковок, геологической среде, конструкции и технологии захоронения и т. д.

2. Подбор глинистых материалов для проведения испытаний, сопоставление первичной информации о них с объемом запасов месторождений и прогнозами добычи. Контроль использования одних и тех же образцов при проведении испытаний разными организациями и сбор результатов в единой базе.

3. Отслеживание и сопоставление результатов исследований, получаемых от разных лабораторий и испытательных центров. Построение системы управления данными исследований и использования их при обосновании выбора материала ИББ.

4. Курирование публикаций научных статей в российских и международных рецензируемых журналах, подготовка технических отчетов, монографий, справочников, которые можно было бы использовать при разработке нормативно-технических и методических документов, позволяющих проектировать, строить, эксплуатировать, закупать и проверять глинистые материалы на основе научно-обоснованных и подтвержденных данных.

5. Мониторинг применения глиняных ИББ на объектах захоронения и консервации РАО и ЯРОО, обобщение опыта и, при необходимости, подготовка рекомендаций к повышению безопасности систем ИББ.

Заключение

Авторы убеждены, что без построения единой системы управления НИОКР по выбору и обоснованию применения глинистых материалов в качестве ИББ при консервации и создании пунктов захоронения РАО и осуществления контроля за процессами проектирования, экспертизы, строительства и эксплуатации этих объектов будет затруднительно и иногда невозможно прогнозировать их безопасность в течение требуемого срока, и проблема ремонта хранилищ, их повторной консервации, дополнительной изоляции или перезахоронения РАО рано или поздно встанет перед будущими поколениями. Организация системной работы и использование передовых технологий при проведении исследований и разработок ИББ на основе глинистых материалов, прежде всего бентонита, позволит повысить эффективность НИОКР, получить научно-обоснованные данные о необходимости и достаточности свойств ИББ, выбрать наиболее подходящие по комплексу характеристик «качество—запасы—цена» материалы

для обеспечения долговременной безопасности объекта захоронения РАО на всей продолжительности его жизненного цикла.

Литература

1. 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.
2. Линге И. И., Иванов А. Ю., Казаков К. С. О системных мерах по расширению применения глиняных материалов на объектах атомной отрасли // Радиоактивные отходы. 2018. № 4 (5). С. 33—41.
3. Материалы научно-технического совета ФГУП «НО РАО» [Оф. сайт ФГУП «НО РАО»]. URL: <http://www.norao.ru/press/news/2277/> (дата обращения 08.10.2019).
4. Отчет ФГУП «НО РАО» по экологической безопасности за 2018 год. [Оф. сайт ФГУП «НО РАО»]. URL: <http://www.norao.ru/upload/iblock/b8c/b8caf63e26f37d0bd767df74d0401b0.pdf> (дата обращения 25.09.2019).
5. Где и как хранят РАО разной классификации. [Оф. сайт ФГУП «НО РАО»]. URL: <http://www.norao.ru/press/media/2247/> (дата обращения 25.09.2019).
6. Пятый национальный доклад Российской Федерации о выполнении обязательств, вытекающих из Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами. Москва 2017. [Оф. сайт ГК «Росатом»] URL.: <https://www.rosatom.ru/upload/iblock/f28/f288b0bef11f34803223e48fba474d28.pdf> (дата обращения 25.09.2019).
7. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Захоронение радиоактивных отходов. принципы, критерии и основные требования безопасности» (НП-055-14) / Утв. Приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 22 августа 2014 г. № 379.
8. Материалы обоснования лицензии на эксплуатацию первой очереди стационарного объекта, предназначенного для захоронения радиоактивных отходов — приповерхностного пункта захоронения твердых радиоактивных отходов, подразделения «Новоуральское» филиала «Северский» ФГУП «НО РАО». [Оф. сайт ФГУП «НО РАО»]. URL: <http://www.norao.ru/ecology/mol/> (дата обращения 25.09.2019).
9. Материалы обоснования лицензии на сооружение (реконструкцию) пункта хранения

- радиоактивных отходов, предназначенного для захоронения радиоактивных отходов, отделения «Новоуральское» филиала «Северский» ФГУП «НО РАО». [Оф. сайт ФГУП «НО РАО»]. URL: <http://www.norao.ru/ecology/mol/> (дата обращения 25.09.2019).
10. Материалы обоснования лицензии на размещение и сооружение приповерхностного пункта захоронения твердых радиоактивных отходов 3 и 4 классов, Челябинская область, Озерский городской округ. [Оф. сайт ФГУП «НО РАО»]. URL: <http://www.norao.ru/ecology/mol/> (дата обращения 25.09.2019).
11. Материалы обоснования лицензии на размещение и сооружение приповерхностного пункта захоронения твердых радиоактивных отходов 3 и 4 классов, Томская область, городской округ ЗАТО Северск. [Оф. сайт ФГУП «НО РАО»]. URL: <http://www.norao.ru/ecology/mol/> (дата обращения 25.09.2019).
12. ГОСТ 28177-89. Глины формовочные бентонитовые. Общие технические условия.
13. Дорощев А. Н., Большов Л. А., Линге И. И., Уткин С. С., Савельева Е. А. Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 33–42.
14. Техническое задание на поставку барьерного материала на основе индивидуального композиционного состава (смеси каолинита, бентонита и вермикулита) для выполнения работ по Государственному контракту № Д.4Ш.21.22.13.1072 по теме «Вывод из эксплуатации промышленного уран графитового реактора ЭИ-2 и площадки 2 реакторного завода ОАО «СХК». АО «ОДЦ УГР». 2013. // Единая информационная система в сфере закупок. URL: <http://zakupki.gov.ru/223/purchase/public/purchase/info/documents.html?regNumber=31300396292> (дата обращения 08.10.2019).
15. Смирнов А. Г. Сердце города. Гордость России // Соавтор, редактор Я. В. Гильмитдинова. Красноярск: ООО «Поликор», 2012, 155 с. URL: http://www.ecp.ru/sites/default/files/download/doc/2017/Heart_City_Pride_Russia.pdf (дата обращения 25.09.2019).
16. Sellin P., Leupin O. X. The Use of Clay as an Engineered Barrier in Radioactive-Waste Management — A Review // Clays and Clay Minerals. 2014. Vol. 61 (6). P. 477–498.
17. Савоненков В. Г., Андерсон Е. А., Шабалев С. И. Глины как геологическая среда для изоляции радиоактивных отходов. СПб. : Радиевый институт им. В. Г. Хлопина, 2012. 215 с.
18. Дриц В. А., Коссовская А. Г. Глинистые минералы: смектиты, смешанослойные образования. М. : Наука, 1990. 214 с.
19. Guggenheim S., Adams J. M., Bain D. C., Bergaya F., Brigatti M. F., Drits V. A., Formoso M. L. L., Gala N. E., Kogure T., 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. 2016. № 54(6). P. 761–772.
20. Wilson M. J. Rock-forming minerals. Sheet Silicates: Clays Minerals. London: The Geological Society. 2013. 724 p.
21. Крупская В. В., Закусин С. В., Чернов М. С., Тюпина Е. А. Особенности сорбции Cs в бентонитовых барьерных системах при захоронении твердых радиоактивных отходов // Горный журнал. 2016. № 2. С. 81–87.
22. Крупская В. В., Закусин С. В., Тюпина Е. А., Доржиева О. В. Преобразование структуры и адсорбционных свойств монтмориллонита при термохимическом воздействии // Геохимия. 2019. Т. 64. № 3. С. 300–319. DOI: 10.31857/S0016-7525643300-319.
23. Захарова Е. В., Меняйло А. А., Андриященко Н. Д., Ермолаев В. М., Зубков А. А., Комаров Е. А., Юшицин К. В. Барьеры безопасности при выводе из эксплуатации и консервации радиационно-опасных объектов. Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы IV Международной конференции, г. Томск, 4–8 июня 2013 г. Томск : Изд-во Томского политехнического ун-та, 2013. 620 с.
24. Обливанцев Д. Ю., Щербакова Е. П. Вопросы использования бентонита в качестве защитного барьера хранилищ радиоактивных отходов // Горный информационно-аналитический бюллетень. Научно-технический журнал. 2007. № 11. С. 116–122.
25. Мартынов К. В., Жаркова В. О., Захарова Е. В. Фильтрация воды через глиняные барьеры безопасности ПЗРО // Труды Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии. Москва, 18–19 апреля 2018 года. М. : ГЕОХИ РАН, 2018. С. 425–428.
26. Karnland O., Olsson S., Nilsson U. Mineralogy and sealing properties of various bentonites and smectite-rich clay materials. Technical Report TR-06-30. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. 2006. ISSN 1404-0344.
27. Амфлет Ч. Неорганические иониты. Пер. с англ. М.: Мир, 1966. 188 с.
28. Путилина В. С., Галицкая И. В., Юганова Т. И. Сорбционные процессы при загрязнении подземных вод тяжелыми металлами и радиоактивными

- элементами. Уран: Аналит. обзор. Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2014. 176 с.
29. Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы в 8 томах. Пред. ред. кол.: Н. П. Лаверов. РАН. Том V. Изоляция отработавших ядерных материалов: геолого-геохимические основы. М.: ИГЕМ РАН, 2008. 254 с.
30. Images of Clay. Mineralogical Society. URL: <https://www.minersoc.org/images-of-clay.html> (дата обращения 08.10.2019).
31. Белоусов П. Е., Крупская В. В. Bentonитовые глины России и стран ближнего зарубежья // Георесурсы. 2019. № 20(3). С. 79—90.
32. Техническое задание на выполнение научно-исследовательской работы «Разработка технологии получения барьерных материалов на основе глинистых пород, залегающих на территории АО «СХК». АО «СХК». 2018. // Единая информационная система в сфере закупок. URL: <http://zakupki.gov.ru/223/purchase/public/purchase/info/documents.html?regNumber=31907745676> (дата обращения 08.10.2019).
33. Техническое задание на поставку сырья, материалов и комплектующих изделий. Предмет закупки: поставка грунта для обратной засыпки котлована зд. № 804 в рамках госконтракта № Д.4ш.21.2.7.16.1086 от 12.07.2016 г. «Подготовительные и демонтажные работы при выводе из эксплуатации корпуса 4 (здание № 804) акционерного общества «Ангарский электролизный химический комбинат» (г. Ангарск, Иркутская область)». АО «ОДЦ УГР». 2019. // Единая информационная система в сфере закупок. URL: <http://zakupki.gov.ru/223/purchase/public/purchase/info/documents.html?regNumber=31908132982> (дата обращения 08.10.2019).
34. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация.
35. Конкурсная документация на проведение конкурса с ограниченным участием в электронной форме на право заключения государственного контракта на выполнение работы: «Вывод из эксплуатации промышленных уран-графитовых реакторов ФГУП «ГХК» в обеспечение мероприятия «Вывод из эксплуатации промышленных уран-графитовых реакторов». ГК «Росатом». 2019. // Единая информационная система в сфере закупок. URL: <http://zakupki.gov.ru/epz/order/notice/oku504/view/documents.html?regNumber=0773100000319000056> (дата обращения 08.10.2019).
36. Техническое задание на выполнение работы «Определение параметров выщелачивания компонентов фосфатного стекла в условиях ПГЗРО и миграции радионуклидов в материалах барьеров безопасности и вмещающих горных породах». ГК «Росатом». 2018. // Единая информационная система в сфере закупок. URL: <http://zakupki.gov.ru/223/purchase/public/purchase/info/documents.html?regNumber=31907650074> (дата обращения 08.10.2019).

Информация об авторах

Ильина Ольга Александровна, директор по развитию, ООО «Компания Bentonит» (125009, Москва, ул. Тверская, д.12, стр.1, офис 24), e-mail: ilina@bentonit.ru.

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

Винокуров Сергей Евгеньевич, кандидат химических наук, заведующий лабораторией, Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (119991, г. Москва, ул. Косыгина, д. 19), e-mail: vinokurov.geokhi@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 статьи

Ильина О. А., Крупская В. В., Винокуров С. Е., Калмыков С. Н. Современное состояние в разработках и использовании глинистых материалов в качестве инженерных барьеров безопасности на объектах консервации и захоронения РАО в России // Радиоактивные отходы. 2019. № 4(9). С. 71—84. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-71-84.

STATE-OF-ART IN THE DEVELOPMENT AND USE OF CLAY MATERIALS
AS ENGINEERED SAFETY BARRIERS AT RADIOACTIVE WASTE CONSERVATION
AND DISPOSAL FACILITIES IN RUSSIA

Iliina O. A.¹, Krupskaya V. V.^{2,3}, Vinokurov S. E.⁴, Kalmykov S. N.⁵

¹Bentonite Company Ltd, Moscow, Russia

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

³Nuclear Safety Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁴Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁵Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Article received on October 29, 2019

The article covers research data from R&Ds carried out in Russia to identify barrier properties of clay mineral raw materials and to develop relevant recommendations regarding the decision making on the use of engineered safety barrier materials performed during design development and construction of RW conservation and disposal facilities. The paper also provides some recommendations concerning the enhancement of R&D management system and increasing R&D applied value to ensure the safety of RW conservation and disposal facilities.

Keywords: radioactive waste, barrier materials, safety barrier, clay materials, nuclear disposal, engineered barriers, research, conservation of radioactive waste, safety assessment, design development.

References

1. Krupskaya V. V., Biryukov D. V., Belousov P. E., Lekhov V. A., Romanchuk A. Yu., Kalmykov S. N. Primenenie prirodnih glinistyh materialov dlya povysheniya urovnya yadernoj i radiacionnoj bezopasnosti ob"ektov yadernogo naslediya [The use of natural clay materials to increase the nuclear and radiation safety level of nuclear legacy facilities]. *Radioaktivnye Othody — Radioactive Waste*, 2018, no.2(3), pp. 30–43.
2. Linge I. I., Ivanov A. Yu., Kazakov K. S. O sistemnyh merah po rasshireniyu primeneniya glinyanyh materialov na ob"ektah atomnoj otrasli [On comprehensive approach to use clay materials as nuclear facilities safety barriers]. *Radioaktivnye Othody — Radioactive Waste*, 2018, no.4(5), pp. 33–41.
3. Materials of the scientific and technical council of FSUE "NO RWM", [Official site of FSUE "NO RWM"]. URL: <http://www.norao.ru/press/media/2277/> (In Russian).
4. FSUE "NO RWM" environmental safety report for 2018. Source: [Official site of FSUE "NO RWM"]. URL:<http://www.norao.ru/upload/iblock/b8c/b8caf-b63e26f37d0bd767df74d0401b0.pdf> (In Russian).
5. Where and how to store radioactive waste of different classification. [Official site of FSUE "NO RWM"]. URL: <http://www.norao.ru/press/media/2247/> (In Russian).
6. The fifth national report of the Russian Federation on compliance with the obligations of the joint convention on the safety of spent fuel management and the safety of radioactive waste management. Moscow, 2017. [Official site of State Corporation Rosatom]. URL: <https://www.rosatom.ru/upload/iblock/f28/f288b0bef11f34803223e48fba474d28.pdf>.
7. Federal norms and rules in the field of atomic energy use "Burial of radioactive waste. Principles, criteria and basic safety requirements" (NP-055-14) / Approved by order of the Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision of August 22, 2014. no. 379. (In Russian).
8. Substantiation of the license for the operation of the first stage of a stationary facility intended for the disposal of radioactive waste — a near-surface solid radioactive waste disposal facility, Novouralskoye branch of the Seversky branch of FSUE "NO RWM". [Official site of FSUE "NO RWM"]. URL: <http://www.norao.ru/ecology/mol/> (In Russian).
9. Materials for the justification of the license for the construction (reconstruction) of a radioactive waste storage facility for the disposal of radioactive waste, Novouralskoye branch of the Seversky branch of FSUE "NO RWM". The same place.
10. Substantiation materials of a license for the placement and construction of a surface disposal facility for solid radioactive waste of classes 3 and 4, Chelyabinsk Region, Ozyorsk City District. The same place.
11. Justification materials for the license for the placement and construction of a surface disposal facility for solid radioactive waste of classes 3 and 4, Tomsk Region, urban district ZATO Seversk. The same place.
12. GOST 28177-89. Gliny formovochnye bentonitovye. Obshchie tekhnicheskie usloviya [Clays molding bentonite. General specifications].

13. Dorofeev A. N., Bolshov L. A., Linge I. I., Utkin S. S., Saveleva E. A. Strategicheskij master-plan issledovanij v obosnovanie bezopasnosti sooruzheniya, ekspluatatsii i zakrytiya punkta glubinno-go zahoroneniya radioaktivnyh othodov [Strategic Master Plan for R&D Demonstrating the Safety of Construction, Operation and Closure of a Deep Geological Disposal Facility for Radioactive Waste]. *Radioaktivnye Othody — Radioactive Waste*, 2017, no. 1, pp. 32–41.
14. The terms of reference for the supply of barrier material based on individual composition (mixture of kaolinite, bentonite and vermiculite) for the performance of work under State contract No. Д.4ИЛ.21.22.13.13.1072 on the topic “Decommissioning of industrial uranium graphite reactor EI-2 and site 2 reactor plant of “SCP” PLC. “PDC UGR” PLC. 2013 // Unified Procurement Information System. URL: <http://zakupki.gov.ru/223/purchase/public/purchase/info/documents.html?regNumber=31300396292> (In Russian).
15. Smirnov A. G. *Serdce goroda. Gordost' Rossii* [The heart of the city. Pride of Russia]. Co-author, editor Ya. V. Gilmitdinova. Krasnoyarsk, LLC Polikor, 2012, p. 155. URL: http://www.ecp.ru/sites/default/files/download/doc/2017/Heart_City_Pride_Russia.pdf (In Russian).
16. Patrik Sellin, Olivier Xavier Leupin. The Use of Clay as an Engineered Barrier in Radioactive-Waste Management — A Review. *Clays and Clay Minerals*, 2014, no. 61 (6).
17. Savonenkov V. G., Anderson E. A., Shabalev S. I. *Gliny kak geologicheskaya sreda dlya izolyatsii radioaktivnyh othodov* [Clays as a geological environment for the isolation of radioactive waste]. St. Petersburg, 2012. 215 p.
18. Drits V. A., Kossovskaya A. G. *Glinistyye mineraly: smektity, smeshanosloynnyye obrazovaniya* [Clay minerals: smectites, mixed-layer formations]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 214 p.
19. Guggenheim S., Adams J. M., Bain D. C., Bergaya F., Brigatti M. F., Drits V. A., Formoso M. L. L., Gala N. E., Kogure T., Stanjek H. (2006) 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*, 2016, no. 54 (6), pp. 761–772.
20. Wilson M. J. *Rock-forming minerals. Sheet Sili-cates: Clays Minerals*. London: The Geological Society. 2013. 724 p.
21. Krupskaya V. V., Zakusin S. V., Chernov M. S., Tyupina E. A. Osobennosti sorbcii Cs v bentonitovyh bar'ernyh sistemah pri zahoronanii tverdyh radioaktivnyh othodov [Features of cesium adsorption on bentonite barriers in solid radioactive waste disposal]. *Gornyi Zhurnal — Mining Journal*, 2016, no. 2, pp. 79–85.
22. Krupskaya V. V., Zakusin S. V., Tyupina E. A. et al. Preobrazovanie struktury i adsorbtsionnyh svoystv montmorillonita pri termohimicheskom vozdeystvii [Transformation of the structure and adsorption properties of montmorillonite under thermochemical exposure]. *Geochemistry — Geohimiya*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 300–319. DOI: 10.31857/S0016-7525643300-319.
23. Zakharova E. V., Menyalo A. A., Andryushchenko N. D., Ermolaev V. M., Zubkov A. A., Komarov E. A., Yushitsin K. V. Bar'ery bezopasnosti pri vyvode iz ekspluatatsii i konservatsii radiacionno-opasnyh ob'ektov [Safety barriers for decommissioning and mothballing of the radiation hazardous sites]. *Materialy IV Mezhdunarodnoj konferencii “Radioaktivnost' i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka”* [Proc. 4th Int. Conf. “Radioactivity and radioactive elements in the human environment”]. Tomsk, Publishing House of the Tomsk Polytechnic University, 2013. 620 p.
24. Oblivantsev D. Yu., Scherbakova Ye. P. Voprosy ispol'zovaniya bentonita v kachestve zashchitnogo bar'era hranilishch radioaktivnyh othodov [Issues of using bentonite as a protective barrier of radioactive waste storage facilities]. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal) — Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2007, no. 11, pp. 116–122.
25. Martynov K. V., Zharkova V. O., Zakharova E. V. Fil'traciya vody cherez glinyanye bar'ery bezopasnosti PZRO [Filtration of water through clay safety barriers of PZRO]. *Trudy Vserossijskogo ezhegodnogo seminaru po eksperimental'noj mineralogii, petrologii i geohimii* [Proc. of the All-Russian annual seminar on experimental mineralogy, petrology and geochemistry]. Moscow, 2018, pp. 425–428.
26. Ola Karnland, Siv Olsson, Ulf Nilsson. Mineralogy and sealing properties of various bentonites and smectite-rich clay materials. Technical Report TR-06-30. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. 2006.
27. Amphlet Ch. *Neorganicheskie ionity* [Inorganic ion exchangers]. Moscow, Mir Publ., 1966. 188 p.
28. Putilina V. S., Galitskaya I. V., Yuganova T. I. *Sorbtsionnyye processy pri zagryaznenii podzemnyh vod tyazhelymi metallami i radioaktivnymi elementami. Uran: Analit. obzor* [Sorptions processes in the contamination of groundwater with heavy metals and radioactive elements. Uranus: Analit. overview]. Novosibirsk, 2014, SPSL SB RAS Publ. 176 p.
29. *Izmenenie okruzhayushchej sredy i klimata: prirodnye i svyazannye s nimi tekhnogennyye katastrofy v 8 tomah* [Changes of natural environment and climate. Natural and possible consequent

- human-induced catastrophes in 8 volumes]. *Tom V. Izolyatsiya otrabotavshih yadernyh materialov: geologo-geohimicheskie osnovy*. [Volume V. Isolation of spent nuclear materials: geological and geochemical basis]. Chairman of the Editorial Board: Laverov N. P. Moscow, IGEM RAS Publ., 2008. 254 p.
30. Images of Clay. Mineralogical Society. URL: <https://www.minersoc.org/images-of-clay.html>.
31. Belousov P. E., Krupskaya V. V. Bentonitovye gliny Rossii i stran blizhnego zarubezh'ya [Bentonite clays of Russia and neighboring countries]. *Georesursy — Georesources*, 2019, no. 21 (3), pp. 79–90. DOI: 10.18599/grs.2019.3.79-90.
32. The terms of reference for the implementation of the research work “Development of technology for producing barrier materials based on clay rocks occurring on the territory of “SCP” PLC. “SCP” PLC. 2018. Unified Procurement Information System. URL: <http://zakupki.gov.ru/223/purchase/public/purchase/info/documents.html?regNumber=31907745676> (In Russian).
33. Terms of reference for the supply of raw materials, materials and components. Subject of procurement: supply of soil for backfilling of the foundation pit, building No. 804 under state contract No. D.4sh.21.2.7.16.1086 dated 07.12.2016, “Preparatory and dismantling work during decommissioning of building 4 (building No. 804) of the Angarsk Electrolysis Chemical Plant Joint Stock Company (Angarsk, Irkutsk region)”. “PDC UGR” PLC. 2019. Unified Procurement Information System. URL: <http://zakupki.gov.ru/223/purchase/public/purchase/info/documents.html?regNumber=31908132982> (In Russian).
34. GOST 25100-2011. Grunty. Klassifikatsiya [Soils. Classification].
35. Tender documentation for the competition with limited participation in electronic form for the right to conclude a state contract for the performance of the work: “Decommissioning of industrial uranium-graphite reactors of FSUE “MCC” in support of the event “Decommissioning of industrial uranium-graphite reactors”. State Corporation Rosatom. 2019. Unified Procurement Information System. URL: <http://zakupki.gov.ru/epz/order/notice/oku504/view/documents.html?regNumber=077310000319000056> (In Russian).
36. The terms of reference for the work “Determination of the parameters of the leaching of components of phosphate glass in the conditions of surface radioactive waste disposal facility and the migration of radionuclides in the materials of safety barriers and surrounding rocks”. State Corporation Rosatom. 2018. Unified Procurement Information System. URL: <http://zakupki.gov.ru/223/purchase/public/purchase/info/documents.html?regNumber=31907650074>. (In Russian).

Information about the authors

Ilina Olga Aleksandrovna, R&D Director, Bentonite Company Ltd (office 24, 12/1 Tverskaya st., Moscow, 125009, Russia), e-mail: ilina@bentonit.ru.

Krupskaya Victoria Valer'yevna, Candidate of Geological and 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 Tulsкая st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: krupskaya@ruclay.com.

Vinokurov Sergey Evgenevich, PhD, Head of Laboratory, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences (19, Kosygina st., Moscow, 119991, Russia), e-mail: vinokurov.geokhi@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, Leninskiy gory, Moscow, 119991, Russia), e-mail: stepan@radio.chem.msu.ru.

Bibliographic description

Ilina O. A., Krupskaya V. V., Vinokurov S. E., Kalmykov S. N. State-of-Art in the Development and Use of Clay Materials as Engineered Safety Barriers at Radioactive Waste Conservation and Disposal Facilities in Russia. *Radioactive Waste*, 2019, no. 4 (9), pp. 71–84. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-71-84. (In Russian).