

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

**ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ
И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ**
DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-3-252-264>
УДК 621.039.7



Оригинальная статья

Н. А. Маковская*, Т. Г. Леонтьева, А. А. Баклай

*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны
Национальной академии наук Беларуси,
а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь*

**ГЛИНЫ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ В КАЧЕСТВЕ ИНЖЕНЕРНЫХ БАРЬЕРОВ
ПРИ ЗАХОРОНЕНИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ**

Аннотация. Определены критерии, на соответствие которым проведена оценка свойств и характеристик глин из промышленно эксплуатируемых месторождений Республики Беларусь с целью определения возможности их дальнейшего использования в составе подстилающего экрана пункта захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) Белорусской АЭС. Выполненный экспериментальный анализ образцов глин 12 месторождений Республики Беларусь показал, что оптимальными показателями по качеству для использования в составе инженерного барьера ПЗРО (подстилающий экран) обладают глины месторождений «Городное» Брестской области и «Марковское» Гомельской области. Установлено, что данные образцы глин обладают высокими сорбционными свойствами в отношении радионуклидов ^{137}Cs и ^{85}Sr . Значения степени сорбции радионуклидов ^{137}Cs и ^{85}Sr из водного раствора для перечисленных образцов глин составляют около 99 %, а значения коэффициента распределения радионуклидов (количественный показатель сорбции) – порядка 10^4 л/кг. С течением времени фиксация ^{137}Cs на исследованных образцах глин увеличивается, то есть в составе подстилающего экрана ПЗРО данные глины будут являться эффективным барьером для предотвращения миграции радионуклидов в окружающую среду в случае разгерметизации упаковок с радиоактивными отходами.

Ключевые слова: глинистые материалы, инженерные барьеры, сорбция радионуклидов, коэффициент распределения, цезий, стронций

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Маковская Наталья Александровна** – кандидат биологических наук, доцент, заведующий лабораторией радиохимических исследований природных сред и экспертизы радиоактивных материалов Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. E-mail: nata.mak@sosny.bas-net.by; *Леонтьева Татьяна Геннадьевна* – старший научный сотрудник лаборатории радиохимических исследований природных сред и экспертизы радиоактивных материалов Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. E-mail: t.leontieva@tut.by; *Баклай Анатолий Анатольевич* – старший научный сотрудник лаборатории радиохимических исследований природных сред и экспертизы радиоактивных материалов Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. E-mail: a.baklay@tut.by

Вклад авторов: *Маковская Наталья Александровна* – обоснование концепции исследования (формулирование идеи, исследовательских целей и задач), анализ и обобщение данных литературы, планирование исследований (подбор месторождений глин, определение показателей и методов исследований глин), сбор и систематизация данных, формулировка выводов, написание текста рукописи; *Леонтьева Татьяна Геннадьевна* – сбор данных литературы, пробоподготовка образцов глин для исследований, проведение исследований сорбционных свойств глин в отношении радионуклидов ^{137}Cs и ^{85}Sr , анализ и систематизация экспериментальных данных, обобщение результатов исследований, редактирование текста рукописи, оформление рукописи, работа с графическим материалом; *Баклай Анатолий Анатольевич* – разработка методологии исследования, анализ и обобщение данных литературы,

проведение радиометрических измерений удельной активности радионуклидов ^{137}Cs и ^{85}Sr в растворах, обобщение и интерпретация результатов исследования, формулировка выводов, написание текста рукописи.

Для цитирования: Маковская, Н. А. Глины Республики Беларусь в качестве инженерных барьеров при захоронении радиоактивных отходов / Н. А. Маковская, Т. Г. Леонтьева, А. А. Баклай // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 3. – С. 252–264. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-3-252-264>

Поступила в редакцию: 13.04.2023

Доработанный вариант: 16.08.2023

Утверждена к публикации: 07.09.2023

Подписана в печать: 21.09.2023

Original article

Natalia A. Makovskaya*, Tatiana G. Leontieva, Anatoly A. Baklay

*The Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny
of the National Academy of Sciences of Belarus,
PO Box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus*

CLAYS OF THE REPUBLIC OF BELARUS AS ENGINEERING BARRIERS FOR DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTE

Abstract. The criteria for compliance with which the properties and characteristics of clays from industrially exploited deposits of the Republic of Belarus were assessed in order to determine the possibility of their further use as part of the underlying screen of the radioactive waste disposal facility (RWDF) of the Belarusian NPP are defined. The performed experimental analysis of clay samples from 12 deposits of the Republic of Belarus showed that clays from the “Gorodnoye” deposits of the Brest region and the “Markovskoye” deposits of the Gomel region have optimal quality indicators for use as part of the RWDF engineering barrier (underlying screen). It has been established that these clay samples have high sorption properties for ^{137}Cs and ^{85}Sr radionuclides. The values of the degree of sorption of ^{137}Cs and ^{85}Sr radionuclides from an aqueous solution for the above clay samples are about 99 %, and the values of the quantitative indicator of sorption the coefficient of distribution of radionuclides – are about 10^4 l/kg. Over time, the fixation of ^{137}Cs on the studied clay samples increases; as part of the underlying RWDF screen, these clays will be an effective anti-migration barrier to prevent the migration of radionuclides into the environment in the event of depressurization of radioactive waste packages.

Keywords: clay materials, engineering barriers, sorption of radionuclides, distribution coefficient, cesium, strontium

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about authors: *Natalia A. Makovskaya** – Cand. Sci. (Biologics), Associate Professor, Head of the Laboratory for Radiochemical Research of Natural Environments and Examination of Radioactive Materials at Join Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: nata.mak@sosny.bas-net.by; *Tatiana G. Leontieva* – Senior Researcher, Laboratory for Radiochemical Research of Natural Environments and Examination of Radioactive Materials at Join Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: t.leontieva@tut.by; *Anatoly A. Baklay* – Senior Researcher, Laboratory for Radiochemical Research of Natural Environments and Examination of Radioactive Materials at Join Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: a.baklay@tut.by

Contribution of the authors: *Natalia A. Makovskaya* – substantiation of the research concept (formulation of the idea, research goals and objectives), analysis and generalization of literature data, research planning (selection of clay deposits, determination of indicators and methods for clay research), collection and systematization of data, formulation of conclusions, writing the text of the manuscript; *Tatiana G. Leontieva* – collection of literature data, sample preparation of clay samples for research, research on the sorption properties of clays in relation to ^{137}Cs and ^{85}Sr radionuclides, analysis and systematization of experimental data, summarizing research results, editing the text of the manuscript, designing the manuscript, working with graphic material; *Anatoly A. Baklay* – development of research methodology, analysis and generalization of literature data, radiometric measurements of the specific activity of ^{137}Cs and ^{85}Sr radionuclides in solutions, generalization and interpretation of research results, formulation of conclusions, writing the text of the manuscript.

For citation: Makovskaya N. A., Leontieva T. G., Baklay A. A. Clays of the Republic of Belarus as engineering barriers for disposal of radioactive waste. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 3, pp. 252–264 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-3-252-264>

Received: 13.04.2023

Modified version: 16.08.2023

Approved for publication: 07.09.2023

Signed to the press: 21.09.2023

Введение. Использование глинистых материалов для нужд атомной отрасли представляет собой весьма перспективное, но пока недостаточно проработанное поле научно-практической деятельности, которое ориентировано, в частности, на создание новых технологий и материалов на основе глин, обеспечивающих надежную изоляцию радиоактивных отходов (РАО). Значительная

роль при решении проблем долгосрочной изоляции и захоронения РАО 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 [1].

Благодаря своим уникальным свойствам глинистые материалы особенно перспективны для применения в качестве материалов ИББ при захоронении РАО [2]. Несмотря на широкое распространение глин в природе, при выборе глинистых материалов для инженерных барьеров еще на проектной стадии разработки пункта захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) следует проводить аналитическую работу по оценке и отбору месторождений, подходящих по запасам, логистике и качеству материала. При отсутствии аналитической проработки изученных свойств глин для применения при захоронении РАО существует вероятность принятия недостаточно обоснованных проектных решений, поскольку в проект могут быть заложены характеристики материалов, которых невозможно достичь или проконтролировать, а излишний консерватизм проектных решений приведет к удорожанию создаваемого объекта. Проектировщик, как правило, не имеет точной 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 в разработке и испытании глинистых материалов в качестве ИББ является комплексной и обусловлена несовершенством нормативно-технической базы по применению глинистых материалов на объектах атомной отрасли как в Российской Федерации [1, 3, 4], так и в Республике Беларусь. Следует отметить, что в НП-055-14 Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности» (утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору Российской Федерации от 22.08.2014 № 379), нормах и правилах по обеспечению ядерной и радиационной безопасности «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности» (утверждены постановлением Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь от 20.01.2012 № 7) и в других нормативных документах отсутствуют конкретные требования и рекомендации по выбору барьерных материалов и их характеристикам. Рассмотрим на примерах выбор барьерных материалов в Российской Федерации с учетом этих требований.

В открытом доступе на официальном ресурсе ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (URL: <https://www.norao.ru/ecology/mol/>) находятся материалы обоснования лицензий на строительство и эксплуатацию приповерхностных пунктов захоронения радиоактивных отходов (ППЗРО), строительство которых выполнено или планируется в различных городах Российской Федерации [1, 3]. В табл. 1 представлены материалы, планируемые к использованию в составе подстилающего и покрывающего экранов при строительстве ППЗРО в России (города Новоуральск, Озерск, Северск) и Беларуси [5]. Расположение слоев различных материалов приведено снизу вверх. Согласно НП-055-14, подстилающий экран – инженерное устройство, располагающееся ниже ячеек захоронения РАО, а покрывающий экран – выше ячеек захоронения РАО, которые служат для гидроизоляции, предотвращения распространения радионуклидов в несущие горные породы, защиты ячеек захоронения РАО от проникновения животных и корней растений.

Видно, что в состав подстилающего и покрывающего экранов ППЗРО обязательно входит глина. Проведенный анализ материалов обоснования лицензий на строительство и эксплуатацию ППЗРО в России показал, что зачастую в них не приводятся требования к свойствам и характеристикам глинистых материалов, которые планируется использовать при устройстве подстилающего экрана. Так, отсутствуют требования к минеральному составу глины, коэффициенту уплотнения, сорбционным свойствам в отношении различных радионуклидов и др., что может повлиять на выбор глинистого материала для использования в составе ИББ [1, 3].

Т а б л и ц а 1. Выбор глинистых материалов в проектах ПЗРО [1, 3]
 T a b l e 1. Choice of clay materials in near-surface RWDF projects [1, 3]

Инженерный барьер безопасности	Новоуральск 1-я очередь	Новоуральск 2-я очередь	Озерск	Северск	ПЗРО Белорусской АЭС
Подстилающий экран	Нет данных	Глиняный экран (толщина 0,5 м) и бентонитовые маты	Глиняный экран (толщина 0,5 м) и бентонитовые маты	Жирная мятая глина (толщина 0,5 м)	Песок, сорбционный слой из уплотненной глины (толщина 0,5 м), сорбционный слой из суглинка (для ОНАО) защитный слой из песка, бетон
Покрывающий экран	Глина (толщина 1,0 м), песчано-гравийная смесь, дробленый камень, почвенно-растительный покров			Бентонитовые маты, песок, слой уплотненной глины или суглинка (толщина 0,5 м), бентонитовые маты, дренажный слой, почвенно-растительный слой	Песок, бентонитовое покрывало (BFG 5000), полиэтилен высокой плотности, бентонитовое покрывало (BFG 5000), песок, щебень, песчаногравийная смесь, плодородный слой земли

Как уже было отмечено, в Республике Беларусь отсутствуют показатели (критерии) для глинистых материалов, позволяющие оценить возможность их использования в составе инженерных барьеров ПЗРО. Анализ европейского и российского опыта использования глин в качестве глиняного экрана при захоронении РАО 3-го и 4-го классов опасности для проектируемых в настоящее время ПЗРО в г. Северск и г. Озерск (Россия) позволил определить основные требования к глинам в составе подстилающего экрана ПЗРО [1, 3, 6]. Выработаны критерии для оценки качества глин, пригодных для использования в составе подстилающего экрана ПЗРО, которые должны иметь:

низкую гидравлическую проводимость (коэффициент фильтрации в уплотненном состоянии – не менее 10^{-5} м/сут);

способность сорбировать радионуклиды, то есть иметь достаточную сорбционную емкость (емкость катионного обмена (ЕКО) – не менее 20 мг-экв/100 г; содержание глинистой фракции (размер частиц < 0,005 мм) – не менее 50 %; содержание минерала монтмориллонита – не менее 30 %, содержание карбонатных минералов – не более 2 %);

способность набухать и иметь пластичность, что способствует герметизации (самозалечивание) трещин (число пластичности – не менее 20);

долговечность, то есть сохранять свойства в течение предусмотренного времени под действием давления и геохимических условий во вмещающей окружающей среде.

Выполнение каждой из указанных функций является важным качеством глинистых материалов как инженерных барьеров для надежной изоляции РАО.

На основании анализа геологической информации в перечень месторождений глин Республики Беларусь с запасами полезного ископаемого не менее 300 тыс. м³ вошли 12 разрабатываемых месторождений глинистых материалов, используемых в настоящее время для кирпичного, черепичного и цементного производства. После отбора глинистых материалов из данных месторождений дальнейшим шагом являлся анализ их физико-химических свойств на соответствие установленным выше критериям качества, а также определение среди них наилучших в отношении сорбции радионуклидов ¹³⁷Cs и ⁸⁵Sr, поскольку в составе РАО средней и низкой активности основными долгоживущими радионуклидами являются ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr. Соответствие полученных значений физико-химических показателей установленным критериям качества и наличие высоких сорбционных свойств в отношении радионуклидов ¹³⁷Cs и ⁸⁵Sr обосновывает возможность использования глинистых материалов в составе подстилающего экрана ПЗРО 3-го и 4-го классов опасности Белорусской АЭС.

Цель работы – установление перечня ключевых критериев качества глин, добываемых в Республике Беларусь, и оценка возможности их использования в составе подстилающего экрана ПЗРО Белорусской АЭС.

Материалы и методы исследований. Объектами исследований стали 12 образцов глинистых материалов, отобранных из эксплуатируемых месторождений Республики Беларусь. Для сравнения в исследованиях использовался образец бентонитовой глины из месторождения «10-й Хутор» (Хакасия, Российская Федерация), которая применяется группой компаний «Бентонит» при изготовлении бентонитосодержащих смесей, буферных засыпок, бентонитовых матов и др., предназначенных для приповерхностного и глубинного захоронения РАО.

Зависимость сорбции ^{137}Cs и ^{85}Sr от времени образцами глин изучали в условиях ограниченного объема при температуре 20 ± 2 °С и концентрации глины в растворе 10 г/л. Растворы ^{137}Cs и ^{85}Sr готовили на основе дистиллированной воды (рН = 6,4). Навеску образца глины перемешивали с радиоактивными растворами ^{137}Cs или ^{85}Sr , удельная активность которых составляла соответственно $1,5 \cdot 10^6$ Бк/л ($3,5 \cdot 10^{-9}$ моль/л) или $1,7 \cdot 10^6$ Бк/л ($2,3 \cdot 10^{-11}$ моль/л). Имитацию высокой концентрации цезия осуществляли с использованием CsNO_3 , а стронция – SrCl_2 . Концентрация стабильного цезия (Cs^+) в водном растворе составляла 10^{-3} моль/л, что эквивалентно $4,4 \cdot 10^{11}$ Бк/л, а стронция (Sr^{2+}) – 10^{-3} моль/л, что эквивалентно $7,4 \cdot 10^{13}$ Бк/л. Через заданные промежутки времени в интервале от 1 ч до 30 сут жидкую и твердую фазы разделяли центрифугированием (10 000 об/мин, 10 мин) и фильтрованием через бумажный фильтр «синяя лента». В полученном фильтрате определяли удельную активность ^{137}Cs и ^{85}Sr прямым спектрометрическим методом по линиям $E_\gamma = 662$ кэВ (^{137}Cs) и $E_\gamma = 514$ кэВ (^{85}Sr) с использованием универсального спектрометрического комплекса РУС-91М. Повторность опытов трехкратная. Степень сорбции (S , %) радионуклидов ^{137}Cs и ^{85}Sr рассчитывали по формуле

$$S = \frac{A_0 - A_p}{A_0} 100 \%, \quad (1)$$

где A_0 и A_p – исходная и равновесная активности радионуклидов ^{137}Cs или ^{85}Sr в растворе соответственно, Бк/л.

Изменение содержания подвижных (водорастворимая и обменная) и фиксированных (кислоторастворимая и остаточная) форм ^{137}Cs и ^{85}Sr в глинах с течением времени определяли с использованием метода последовательной десорбции ^{137}Cs и ^{85}Sr различными реагентами (дистиллированная вода, 1М NH_4COOH и 1М HCl). Изучение влияния рН раствора и концентрации катионов K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} на сорбционные характеристики образцов глин осуществляли с использованием микроколичеств радионуклидов ^{137}Cs ($3,5 \cdot 10^{-9}$ моль/л) и ^{85}Sr ($2,3 \cdot 10^{-11}$ моль/л) в статических условиях при соотношении фаз твердое : жидкое равном 1 : 100 в течение 3 сут (достаточно для установления сорбционного равновесия). Для количественной характеристики распределения радионуклидов ^{137}Cs и ^{85}Sr в системе твердая фаза – раствор широко используемым параметром является коэффициент распределения (K_d , л/кг), равный отношению равновесных концентраций радионуклида ^{137}Cs или ^{85}Sr в твердой и жидкой фазах глин. Коэффициент распределения ^{137}Cs или ^{85}Sr определяли по формуле

$$K_d = \frac{A_0 - A_p}{A_p} \frac{V}{m}, \quad (2)$$

где V – объем раствора, л; m – масса образца, кг.

Коэффициент распределения является основным параметром, который экспериментально определяет задерживающие (барьерные) свойства глинистых материалов и широко используется в расчетных формулах и моделях миграции радионуклидов. В качестве инженерных барьеров применяются глины, которые имеют максимальную способность удерживать и поглощать радионуклиды. К глинам, обладающим такими свойствами, относятся бентонитовые глины, а также глины, содержащие значительное количество глинистых минералов группы монтмориллонита [1, 2].

Результаты и их обсуждение. Анализ «плеча доставки» глин к месту предполагаемого строительства ПЗРО (Островецкий район, Гродненская область) показал, что ни одно из эксплуатируемых месторождений глин не попадает в 70-километровую зону Белорусской АЭС. Они расположены в Брестской, Витебской, Гомельской и Минской областях. На основании определенного

для 12 образцов глин числа пластичности, которое в соответствии с установленным критерием должно быть не менее 20, выбраны 6 образцов глин, удовлетворяющих данному критерию. Далее в результате определения ЕКО, содержания монтмориллонита и карбонатных минералов в образцах глин установлено, что выбранным критериям удовлетворяют только три образца глины, отобранные из месторождений «Городное» (Брестская область), «Марковское» (Гомельская область) и «10-й Хутор» (Хакасия, Российская Федерация). Характеристика физико-химических свойств образцов глин приведена в табл. 2.

Таблица 2. Физико-химические свойства глин месторождений Республики Беларусь
 Table 2. Physical and chemical properties of clay deposits of the Republic of Belarus

Наименование месторождения	ЕКО, мг-экв/100 г	Число пластичности, %	Коэффициент фильтрации, м/сут	Содержание		
				глинистой фракции (< 0,005 мм), %	монтмориллонита, мас. %	карбонатных минералов, %
Значение критерия	не менее 20	не менее 20	не более 10^{-5}	не менее 50	не менее 30	не более 2
«Кустиха»	28,9	27,9	$4,0 \cdot 10^{-6}$	78,2	28,5	0
«Городное»	20,3	23,4	$8,0 \cdot 10^{-6}$	59,1	36,3	0
«Михайловка»	15,6	21,7	–	71,5	8,7	14,4
«Щебрин»	13,3	23,7	–	66,6	11,1	27,0
«Марковское»	24,2	24,1	$9,0 \cdot 10^{-6}$	55,7	37,6	0
«Лукомль-1»	19,5	23,9	–	71,7	10,1	8,2
«10-й Хутор»	45,6	36,1*	$2,2 \cdot 10^{-5*}$	70,5*	58,8*	1,9

* Данные предоставлены ООО «Бентонит Хакасии».

Таким образом, после изучения комплекса физико-химических свойств отбор прошли глины месторождений «Городное» и «Марковское», а также бентонитовая глина месторождения «10-й Хутор», которые полностью соответствовали всем установленным критериям качества глинистого сырья и далее использовались для радиохимических исследований в отношении сорбции радионуклидов ^{137}Cs и ^{85}Sr .

Сорбционная активность глинистых материалов напрямую связана с наличием в их составе таких глинистых минералов, как монтмориллонит, иллит и смешаннослойные минералы монтмориллонит-иллит. Основными минералами, входящими в состав образца глины месторождения «Городное», являются: монтмориллонит и смешаннослойные минералы монтмориллонит-иллит (36,3 %), иллит и смешаннослойные минералы иллит-монтмориллонит (4,8 %), каолинит/7Å галлуазит (7 %), кварц (43,9 %), калиевый полевой шпат (микроклин) (2,8 %), а также незначительные количества хлорита, амфиболов и анатаза. Для образца глины месторождения «Марковское» основные минералы следующие: монтмориллонит и смешаннослойные минералы монтмориллонит-иллит (37,6 %), иллит и смешаннослойные минералы иллит-монтмориллонит (3,6 %), каолинит/7Å галлуазит (14,7 %), кварц (34,3 %), калиевый полевой шпат (микроклин) (6,7 %), плагиоклаз (альбит) (2,3 %), а также незначительное количество анатаза. Таким образом, в глинах месторождений «Городное» и «Марковское» наблюдается преобладание набухающих минералов (монтмориллонита и смешаннослойных минералов ряда иллит-монтмориллонит со значительным преобладанием монтмориллонитовых межслоев), что будет способствовать эффективной сорбции радионуклидов ^{137}Cs и ^{85}Sr .

В ходе исследований образцы глин подвергались многофакторному анализу и использовались в экспериментах с моделированием различных условий, влияющих на процесс сорбции радионуклидов ^{137}Cs и ^{85}Sr (концентрация радионуклидов и конкурирующих в растворе катионов, pH раствора). Катионообменные свойства глинистых минералов в составе природных глин используются в основном для извлечения ионных форм радионуклидов, прежде всего цезия и стронция. Степень извлечения (сорбции) радионуклидов ^{137}Cs и ^{85}Sr глинистыми минералами зависит от концентрации радионуклидов в водных растворах (макроколичество – 10^{-3} моль/л или микроколичество – 10^{-6} – 10^{-9} моль/л).

Сорбция ^{137}Cs . Коэффициент распределения ^{137}Cs для глинистых минералов (монтмориллонит и иллит) зависит от концентрации цезия в водном растворе, что связано с наличием в них двух типов сорбционных центров, отличающихся по емкости и прочности связывания цезия [7]. Проведенные исследования влияния малых и больших концентраций катионов $^{137}\text{Cs}^+$ и Cs^+ в водном растворе на сорбцию образцами глин с течением времени (от 1 ч до 30 сут) показали, что процесс сорбции как радиоактивного ($^{137}\text{Cs}^+$), так и стабильного цезия (Cs^+) глинистыми материалами состоит из двух стадий: быстрой, при которой сорбируется более 90 % цезия ($[\text{Cs}^+] = 3,5 \cdot 10^{-9}$ моль/л) в течение 1 сут и более 50 % цезия ($[\text{Cs}^+] = 10^{-3}$ моль/л) – в течение 1 ч и медленной, включающей проникновение (диффузию) цезия в микропоры частиц глинистых минералов. Время установления сорбционного равновесия не превышает 3 сут. Полученные значения степени сорбции ^{137}Cs (S , %) и коэффициента распределения ^{137}Cs (K_d , л/кг) для равновесных условий представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Сорбционные характеристики образцов глин в отношении ^{137}Cs при различной концентрации
Table 3. Sorption characteristics of clay samples with respect to ^{137}Cs at different concentrations

Наименование месторождения	Степень сорбции, %		Коэффициент распределения, л/кг	
	$[\text{Cs}^+] = 3,5 \cdot 10^{-9}$ моль/л	$[\text{Cs}^+] = 10^{-3}$ моль/л	$[\text{Cs}^+] = 3,5 \cdot 10^{-9}$ моль/л	$[\text{Cs}^+] = 10^{-3}$ моль/л
«Городное»	99,6	73,3	$2,6 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^2$
«Марковское»	99,3	68,3	$1,5 \cdot 10^4$	$2,2 \cdot 10^2$
«10-й Хутор»	92,2	91,1	$1,2 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^3$

Определение K_d показало, что в порядке уменьшения его значения при следовых (низких) концентрациях $^{137}\text{Cs}^+$ ($3,5 \cdot 10^{-9}$ моль/л) в водном растворе глины располагаются следующим образом: «Городное» > «Марковское» > «10-й Хутор»; при высоких концентрациях $^{137}\text{Cs}^+$ и Cs^+ (10^{-3} моль/л) в водном растворе: «10-й Хутор» > «Городное» > «Марковское». При увеличении концентрации ^{137}Cs в водном растворе наблюдается снижение его сорбции для исследованных глин, что объясняется постепенным насыщением высокоселективных сорбционных центров в образце. При следовых концентрациях $^{137}\text{Cs}^+$ происходит его связывание с высокоселективными сорбционными центрами, а с последующим ростом концентрации катиона Cs^+ – насыщение данных центров, и в процессе сорбции начинают участвовать менее селективные центры, количество которых в структуре минералов на несколько порядков выше [7]. Благодаря высокому содержанию монтмориллонита и большой ЕКО бентонитовая глина месторождения «10-й Хутор» способна сорбировать большое количество цезия, который преимущественно будет удерживаться в межслоевом промежутке без существенного изменения физико-механических свойств глины.

Основными механизмами миграции радионуклидов в профиле глинистого материала (подстилающий экран) являются конвективный перенос потоком влаги и диффузия, которые тесно связаны с сорбцией и прочностью закрепления (фиксации) радионуклидов в твердой фазе глинистого материала. Способность радионуклидов переходить в водную среду, а соответственно, и их потенциальная способность к миграции определяются начальными физико-химическими формами нахождения радионуклидов в глинистых материалах. Поэтому при изучении сорбции ^{137}Cs глинами от времени с использованием метода последовательной десорбции ^{137}Cs различными реагентами выделены подвижные (водорастворимая и обменная) и фиксированные (кислоторастворимая и остаточная) формы ^{137}Cs . Результаты проведенных исследований показали, что для образцов глин при продолжительном контакте с раствором ^{137}Cs происходит перераспределение между подвижными и фиксированными формами ^{137}Cs с постепенным увеличением доли последних в решетке глинистых минералов (рис. 1). Установлено, что наибольшей фиксирующей способностью по отношению к ^{137}Cs после 30 сут взаимодействия с радиоактивным раствором ^{137}Cs обладает глина месторождения «Марковское» (содержание фиксированной формы ^{137}Cs составляет 95,3 % от сорбированного ^{137}Cs), а наименьшей – бентонитовая глина месторождения «10-й Хутор» (см. рис. 1). Из полученных данных видно, что ^{137}Cs сорбируется в глинах необратимо, то есть происходит его фиксация в глинистых минералах.

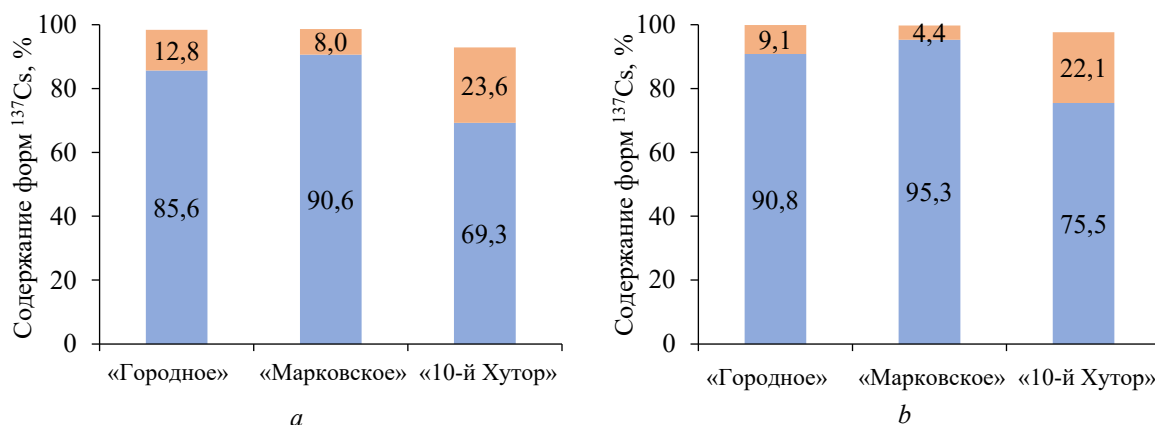


Рис. 1. Содержание форм ^{137}Cs в образцах глин после 1 сут (a) и 30 сут (b) взаимодействия с раствором ^{137}Cs :
 ■ подвижные формы, ■ фиксированные формы

Fig 1. The content of ^{137}Cs forms in clay samples after 1 day (a) and 30 days (b) of interaction with ^{137}Cs solution:
 ■ movable forms, ■ fixed forms

На рис. 2 приведены зависимости сорбции ^{137}Cs ($\lg K_d$) образцами глин месторождений «Городное» и «Марковское» в сравнении с образцом бентонитовой глины месторождения «10-й Хутор» от значений pH (кислотности) раствора. При этом концентрация радионуклида ^{137}Cs в водном растворе составляла $3,5 \cdot 10^{-9}$ моль/л, содержание глины – 10 г/л, а pH водного раствора изменялся от 2,6 до 11,8.

Как видно из рис. 2 зависимости сорбции ^{137}Cs от pH раствора для обоих образцов глин носят схожий характер. Проведенные исследования показали, что сорбция ^{137}Cs в области значений pH от 5 до 10 практически не изменяется, а при pH < 5 заметно снижается. При pH > 10 происходит снижение сорбции ^{137}Cs образцом глины месторождения «Городное». Такой характер сорбции ^{137}Cs на глинистых материалах в области pH от 5 до 10 подтверждает тот факт, что взаимодействие происходит по механизму ионного обмена [8].

Для количественной оценки влияния различных концентраций катионов K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , присутствующих в природных водных средах, на сорбцию ^{137}Cs образцами глин использовали K_d . Концентрация K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} в растворе изменялась в интервале от 0,001 до 0,1 моль/л. На рис. 3 представлена зависимость $\lg K_d$ ^{137}Cs для образцов глин от логарифма концентраций катионов K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , присутствующих в модельном растворе. Видно, что присутствие в растворе указанных катионов снижает сорбцию ^{137}Cs образцами глин. Наиболее существенно на сорбцию влияет присутствие в водном растворе катиона K^+ , особенно при его высоких

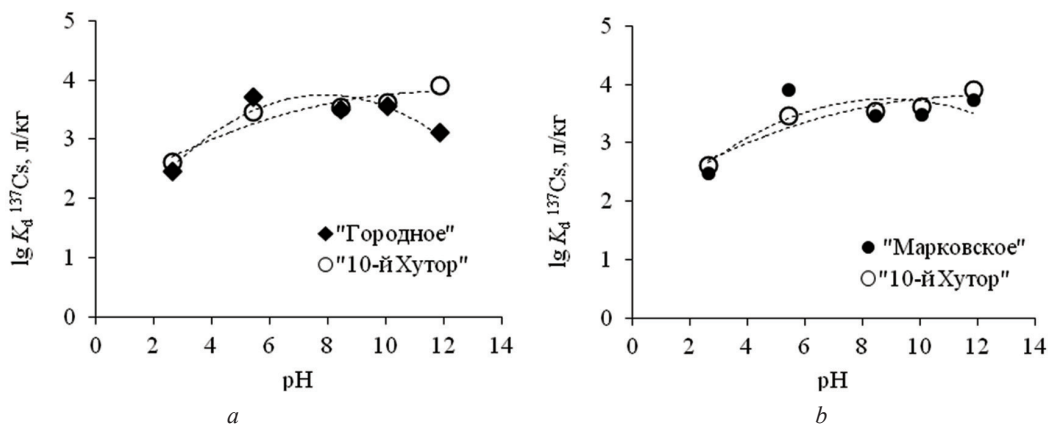


Рис. 2. Зависимость сорбции ^{137}Cs от pH водного раствора для образцов глин месторождений «Городное» (a) и «Марковское» (b) в сравнении с бентонитовой глиной «10-й Хутор»

Fig 2. Dependence of ^{137}Cs sorption on aqueous solution pH for clay samples from the “Gorodnoye” (a) and “Markovskoye” (b) deposits in comparison with bentonite clay from “10th Khutor”

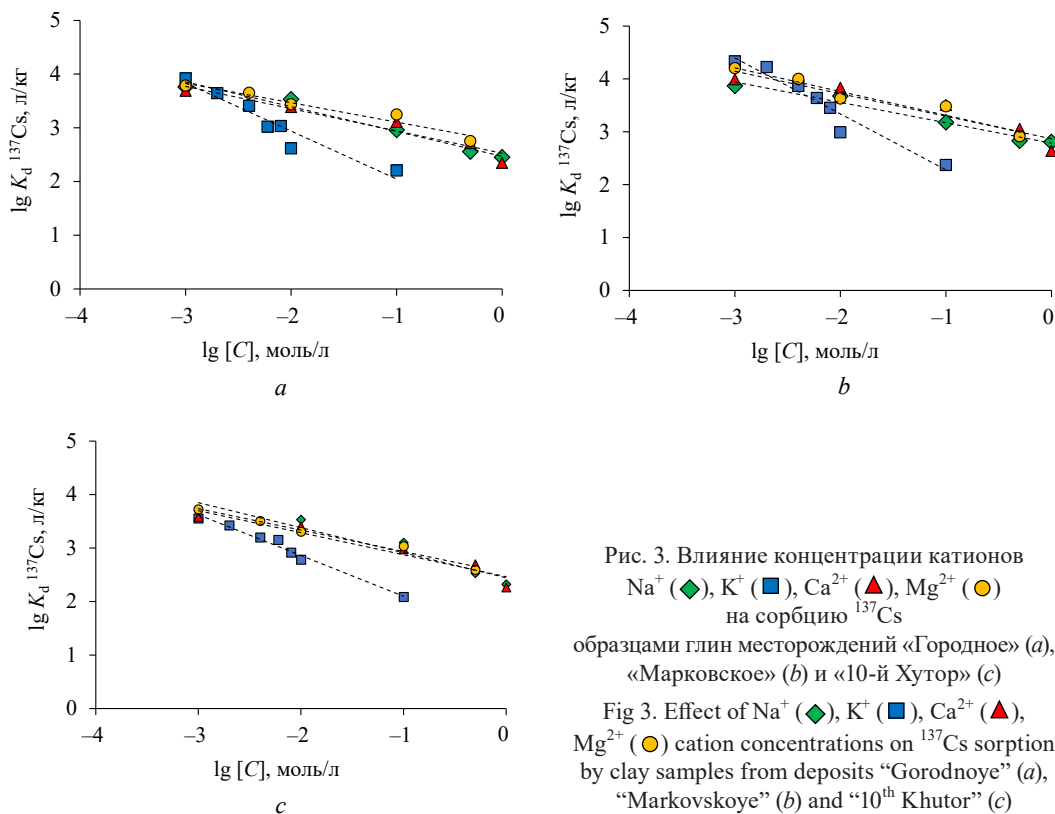


Рис. 3. Влияние концентрации катионов Na^+ (◆), K^+ (■), Ca^{2+} (▲), Mg^{2+} (●) на сорбцию ^{137}Cs образцами глин месторождений «Городное» (а), «Марковское» (b) и «10-й Хутор» (c)
Fig 3. Effect of Na^+ (◆), K^+ (■), Ca^{2+} (▲), Mg^{2+} (●) cation concentrations on ^{137}Cs sorption by clay samples from deposits “Gorodnoye” (a), “Markovskoye” (b) and “10th Khutor” (c)

концентрациях (более 0,01 моль/л), поскольку K^+ является геохимическим аналогом ^{137}Cs и создает ему конкуренцию за места сорбции на глинистых минералах. При концентрации Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} в растворе до 0,1 моль/л значение K_d ^{137}Cs составляет более 10^3 л/кг, а при концентрации K^+ равной 0,1 моль/л – порядка 10^2 л/кг. Таким образом, катионы Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} в широком диапазоне концентраций (до 0,1 моль/л) практически не оказывают значимого влияния на сорбцию ^{137}Cs образцами исследованных глин. По способности подавлять (снижать) сорбцию ^{137}Cs на глинах макрокатионы можно расположить в порядке: $\text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$.

Сорбция ^{85}Sr . Проведенные исследования влияния малых (следовых) и больших концентраций катионов $^{85}\text{Sr}^{2+}$ и Sr^{2+} в водном растворе на сорбцию образцами глин с течением времени (от 1 ч до 30 сут) показали, что кинетические кривые для образцов глин носят схожий характер. Установлено, что, как и для ^{137}Cs , процесс сорбции ^{85}Sr состоит из двух стадий: быстрой, при которой сорбируется более 90 % стронция ($[^{85}\text{Sr}^{2+}] = 2,3 \cdot 10^{-11}$ моль/л) в течение 1 сут и более 62 % стронция ($^{85}\text{Sr}^{2+}$ и $\text{Sr}^{2+} = 10^{-3}$ моль/л) – в течение 1 ч, и медленной, включающей проникновение (диффузию) ^{85}Sr в частицы глинистых материалов. Время установления сорбционного равновесия не превышает 3 сут. Полученные значения S и K_d для равновесных условий представлены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4. Сорбционные характеристики образцов глин в отношении ^{85}Sr при различной концентрации
Table 4. Sorption characteristics of clay samples with respect to ^{85}Sr at different concentrations

Наименование месторождения	Степень сорбции, %		Коэффициент распределения, л/кг	
	$[^{85}\text{Sr}^{2+}] = 2,3 \cdot 10^{-11}$ моль/л	$[^{85}\text{Sr}^{2+} \text{ и } \text{Sr}^{2+}] = 10^{-3}$ моль/л	$[^{85}\text{Sr}^{2+}] = 2,3 \cdot 10^{-11}$ моль/л	$[^{85}\text{Sr}^{2+} \text{ и } \text{Sr}^{2+}] = 10^{-3}$ моль/л
«Городное»	99,5	70,9	$2,4 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^2$
«Марковское»	99,7	70,0	$4,1 \cdot 10^4$	$2,3 \cdot 10^2$
«10-й Хутор»	96,7	98,2	$3,0 \cdot 10^3$	$6,0 \cdot 10^3$

Согласно полученным данным, в порядке уменьшения значений K_d при следовых (низких) концентрациях $^{85}\text{Sr}^{2+}$ ($2,3 \cdot 10^{-11}$ моль/л) в водном растворе образцы глин располагаются следующим образом: «Марковское» > «Городное» > «10-й Хутор»; при высоких концентрациях $^{85}\text{Sr}^{2+}$ и Sr^{2+} (10^{-3} моль/л) в водном растворе: «10-й Хутор» > «Городное» > «Марковское». При увеличении

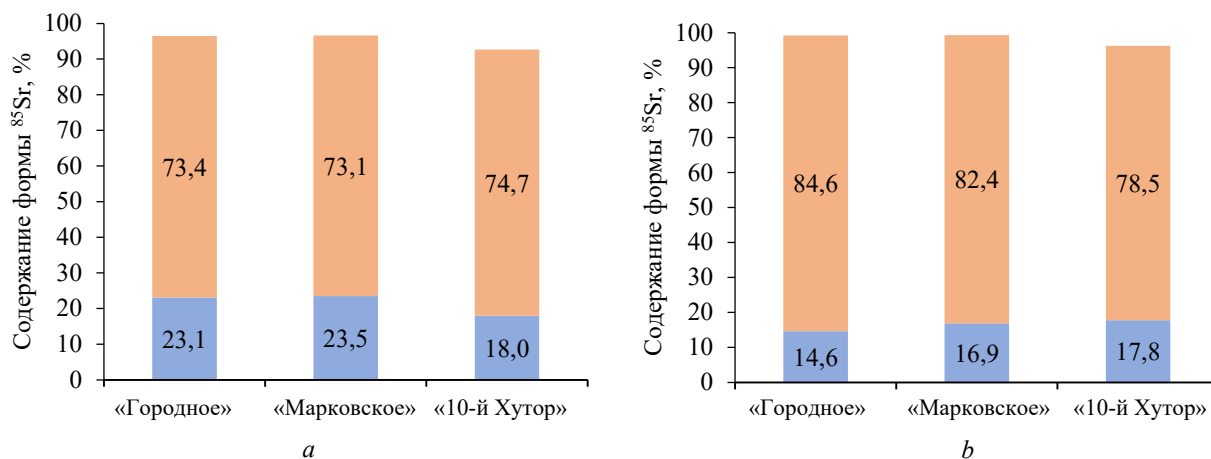


Рис. 4. Содержание форм ^{85}Sr в образцах глин после 1 сут (а) и 30 сут (б) взаимодействия с раствором ^{85}Sr :
 ■ подвижные формы, ■ фиксированные формы

Fig 4. The content of ^{85}Sr forms in clay samples after 1 day (a) and 30 days (b) of interaction with ^{85}Sr solution
 ■ movable forms, ■ fixed forms

концентрации стронция в растворе наблюдается снижение его сорбции образцами глин. Благодаря высокому содержанию монтмориллонита и большой ЕКО бентонитовая глина месторождения «10-й Хутор» эффективно сорбирует стронций при увеличении его концентрации в растворе до 10^{-3} моль/л.

При оценке сорбционной способности глин как потенциального материала системы инженерных барьеров ПЗРО важно учитывать наличие двух основных механизмов сорбции ^{85}Sr – ионообменной сорбции, когда поглощенные радионуклиды находятся в состоянии динамического равновесия с водорастворимыми и обменными формами радионуклидов, и необменной сорбции, в результате которой ^{85}Sr фиксируется глинами. Полученные результаты по распределению подвижных и фиксированных форм ^{85}Sr от времени (рис. 4) показывают, что преобладающим механизмом сорбции ^{85}Sr на образцах глин является ионный обмен (содержание подвижных форм ^{85}Sr после 1 сут взаимодействия со ^{85}Sr составляет 73–75 %, на долю фиксированных форм ^{85}Sr приходится 18–24 %).

С увеличением времени взаимодействия раствора ^{85}Sr и глин до 30 сут содержание фиксированных форм ^{85}Sr снижается, что связано с особенностями поведения ^{85}Sr . По данным [9], процесс трансформации радионуклида ^{85}Sr в фиксированную форму достаточно долгий и обратимый. Наибольшей фиксирующей способностью по отношению к ^{85}Sr среди исследованных образцов глин обладает бентонитовая глина месторождения «10-й Хутор» (содержание фиксированной формы ^{85}Sr после 30 сут взаимодействия с раствором ^{85}Sr составляет 17,8 % от сорбированного ^{85}Sr). Относительное изменение содержания подвижных и неподвижных форм ^{85}Sr в глинах с течением времени может рассматриваться как динамический показатель геохимической миграционной способности ^{85}Sr .

На рис. 5 приведены зависимости сорбции ^{85}Sr ($\lg K_d$) образцами глин месторождений «Городное» и «Марковское» в сравнении с образцом бентонитовой глины месторождения «10-й Хутор» от значений pH раствора. При этом концентрация радионуклида ^{85}Sr в водном растворе составляла $2,3 \cdot 10^{-11}$ моль/л, содержание глины – 10 г/л, а pH водного раствора изменялся от 2,5 до 12,3.

Как видно из рис. 5, зависимость сорбции ^{85}Sr от pH раствора для исследованных образцов глин носит схожий характер с поведением ^{137}Cs для этих же образцов глин. Установлено, что ^{85}Sr максимально сорбируется на белорусских глинах при значениях pH от 8 до 11, а при значениях pH < 8 и pH > 11 сорбция ^{85}Sr снижается. Сорбция ^{85}Sr в области $6 < \text{pH} \leq 11$ для глин месторождений «Городное» и «Марковское» выше, чем для бентонитовой глины месторождения «10-й Хутор». Отметим, что при меньшем содержании в белорусских глинах монтмориллонита по сравнению с бентонитовой глиной «10-й Хутор» в них наблюдается более высокая степень

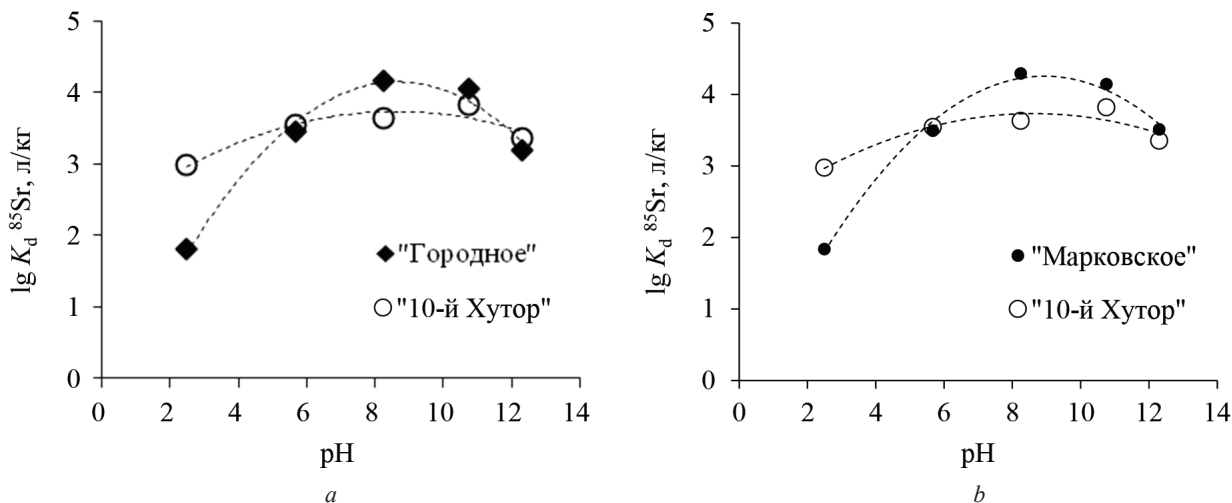


Рис. 5. Зависимость сорбции ^{85}Sr от pH водного раствора для образцов глин месторождений «Городное» (a) и «Марковское» (b) в сравнении с бентонитовой глиной «10-й Хутор»

Fig 5. Dependence of ^{85}Sr sorption on the pH of the aqueous solution for clay samples from the “Gorodnoye” (a) and “Markovskoye” (b) deposits in comparison with bentonite clay from “10th Khutor”

сорбции радионуклида ^{85}Sr , что связано с особенностями состава глин месторождений «Городное» и «Марковское» и наличием значительного количества железистых пленок на поверхности частиц глин и смешаннослойного минерала монтмориллонит-иллит. Согласно экспериментальным данным сорбция ^{85}Sr глинами в области pH от 5 до 8 незначительно увеличивается, что свидетельствует о взаимодействии между глинистым материалом и радионуклидом ^{85}Sr по механизму ионного обмена. При повышении pH > 8 сорбция ^{85}Sr на глинистых материалах возрастает, достигая максимума при pH равном 10–11 за счет механизма поверхностного комплексообразования. Подобное сорбционное поведение радиостронция при различных значениях pH раствора наблюдалось для глин, содержащих глинистые минералы типа 2 : 1 (монтмориллонит, иллит, смешаннослойный минерал монтмориллонит-иллит) [10].

На рис. 6 представлена зависимость логарифма K_d ^{85}Sr для образцов глин от логарифма концентраций катионов K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , присутствующих в модельном растворе. Концентрация K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} в растворе изменялась в интервале от 0,001 до 0,1 моль/л.

Видно, что влияние катионов Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} на сорбцию ^{85}Sr образцами глин месторождений «Городное» и «Марковское» носит схожий характер. В [11] показано, что ионный обмен является определяющим механизмом сорбции ^{85}Sr глинистыми минералами. На поведение ^{85}Sr влияют кислотность (pH) и ионная сила раствора, а сам ^{85}Sr доминирует при сорбции над большинством щелочных и щелочноземельных металлов при конкуренции за обменные позиции: $\text{Sr}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$. Для исследованных образцов глин сорбция ^{85}Sr носит преимущественно ионообменный характер, и значения K_d ^{85}Sr закономерно уменьшаются с увеличением концентрации катионов Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} в растворе. Из полученных данных следует, что на сорбцию ^{85}Sr образцами глин наиболее существенное влияние оказывают катионы Ca^{2+} и Mg^{2+} по сравнению с катионами Na^+ и K^+ , поскольку данные макрокатионы по своим химическим свойствам близки к ^{85}Sr .

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что глины месторождений «Городное» и «Марковское» эффективно сорбируют ^{137}Cs и ^{85}Sr в микроконцентрациях, при этом значения степени сорбции составляют около 99 %, а коэффициенты распределения – 10^4 л/кг. Наиболее сильно радионуклиды ^{137}Cs и ^{85}Sr сорбируются глинами в средах от слабокислой до щелочной и слабо сорбируются в сильнокислых и сильнощелочных средах. Ключевыми факторами, влияющими на поглощение ^{137}Cs глинистыми минералами, являются: количество высоко-селективных сорбционных центров и концентрация макроэлемента K^+ в растворе. Основными параметрами, влияющими на сорбцию ^{85}Sr , являются: емкость катионного обмена глин и состав ее обменных катионов, а также концентрация катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} в растворе.

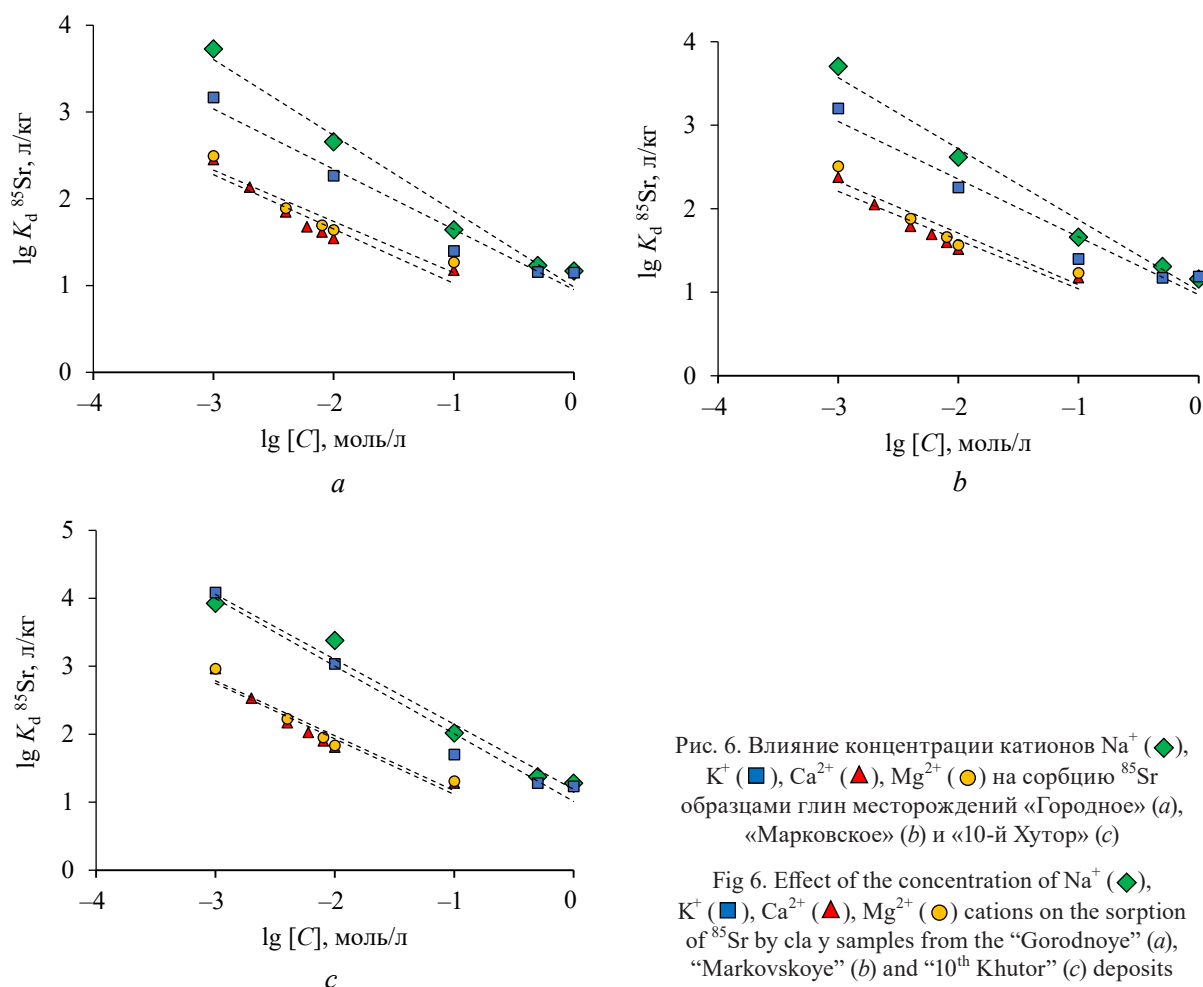


Рис. 6. Влияние концентрации катионов Na^+ (◆), K^+ (■), Ca^{2+} (▲), Mg^{2+} (●) на сорбцию ^{85}Sr образцами глин месторождений «Городное» (a), «Марковское» (b) и «10-й Хутор» (c)

Fig 6. Effect of the concentration of Na^+ (◆), K^+ (■), Ca^{2+} (▲), Mg^{2+} (●) cations on the sorption of ^{85}Sr by clay samples from the “Gorodnoye” (a), “Markovskoye” (b) and “10th Khutor” (c) deposits

Заклучение. В соответствии с определенными критериями для оценки возможного использования глин Республики Беларусь в составе подстилающего экрана ПЗРО Белорусской АЭС установлено, что по физико-химическим показателям им соответствуют глины из эксплуатируемых в настоящее время месторождений «Городное» (Брестская область) и «Марковское» (Гомельская область). Показано, что данные образцы белорусских глин обладают высокими сорбционными свойствами в отношении ^{137}Cs и ^{85}Sr . Значения степени сорбции ^{137}Cs и ^{85}Sr из водного раствора составляют около 99 %, а значения количественного показателя сорбции (коэффициента распределения радионуклидов) – порядка 10^4 л/кг. С течением времени фиксация ^{137}Cs на глинах увеличивается, то есть в составе подстилающего экрана данные глины будут являться эффективным противомиграционным барьером на пути распространения радионуклидов в окружающую среду в случае разгерметизации упаковок с радиоактивными отходами.

По совокупности проведенных исследований выбранные глины из месторождений «Городное» и «Марковское» могут быть рекомендованы в качестве перспективных глинистых материалов для использования в составе подстилающего экрана (сорбционный слой глины) приповерхностного ПЗРО Белорусской АЭС.

Список использованных источников

1. Современное состояние в разработках и использовании глинистых материалов в качестве инженерных барьеров безопасности на объектах консервации и захоронения радиоактивных отходов в России / О. А. Ильина [и др.] // Радиоактивные отходы. – 2019. – № 4(9). – С. 71–84. <https://doi.org/10.25283/2587-9707-2019-4-71-84>
2. Применение природных глинистых материалов для повышения уровня ядерной и радиационной безопасности объектов ядерного наследия / В. В. Крупская [и др.] // Радиоактивные отходы. – 2018. – № 2(3). – С. 30–43.
3. Линге, И. И. О системных мерах по расширению применения материалов на основе глин на объектах атомной отрасли / И. И. Линге, А. Ю. Иванов, К. С. Казаков // Радиоактивные отходы. – 2018. – № 4(5). – С. 33–41.

4. Савоненков, В. Г. Глины как геологическая среда для изоляции радиоактивных отходов / В. Г. Савоненков, Е. Б. Андерсон, С. И. Шабалев. – СПб.: ИД «Инфо Ол», 2012. – 216 с.
5. Жемжуров, М. Л. Техническая концепция захоронения очень низкоактивных, низкоактивных и короткоживущих среднеактивных радиоактивных отходов Белорусской АЭС / М. Л. Жемжуров, Н. Д. Кузьмина // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, № 1. – С. 105–118. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-1-105-118>
6. Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО / Н. С. Цебаковская [и др.]; под ред. И. И. Линге, Ю. Д. Полякова. – М.: Комтехпринт, 2015. – 208 с.
7. Poinssot, C. Experimental and modelling studies of caesium sorption on illite / C. Poinssot, B. Baeyens, M. H. Bradbury // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. – 1999. – Vol. 63, № 19/20. – P. 3217–3227. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00246-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00246-X)
8. Cs⁺ sorption onto Kutch clays: Influence of competing ions // A. S. Semenkova [et al.] // *Appl. Clay Sci.* – 2019. – Vol. 166. – P. 88–93. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.09.010>
9. Булгаков, А. А. Моделирование долговременной трансформации форм нахождения ⁹⁰Sr в почвах / А. А. Булгаков, А. В. Коноплев // *Почвоведение*. – 2005. – № 7. – С. 825–831.
10. Путилина, В. С. Сорбционные процессы при загрязнении подземных вод тяжелыми металлами и радиоактивными элементами. Стронций: анализ. обзор / В. С. Путилина, И. В. Галицкая, Т. И. Юганова. – Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2013. – 95 с.
11. Белицкий, А. С. Охрана подземных вод от радиоактивных загрязнений / А. С. Белицкий, Е. И. Орлова. – М.: Медицина, 1968. – 209 с.

References

1. Pina 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. *Radioaktivnye otkhody = Radioactive Waste*, 2019, no. 4 (9), pp. 71–84 (in Russian). <https://doi.org/10.25283/2587-9707-2019-4-71-84>
2. 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. *Radioaktivnye otkhody = Radioactive Waste*, 2018, no. 2 (3), pp. 30–43 (in Russian).
3. Linde I. I., Ivanov A. Yu., Kazakov K. S. On comprehensive approach to use clay materials as nuclear facilities safety barriers. *Radioaktivnye otkhody = Radioactive Waste*, 2018, no. 4 (5), pp. 33–41 (in Russian).
4. Savonenkov V. G., Anderson E. B., Shabalev S. I. *Clays as a Geological Environment for the Isolation of Radioactive Waste*. St. Petersburg, Info Ol Publ., 2012. 216 p. (in Russian).
5. Zhemzhurov M. L., Kuzmina N. D. Technical concept of disposal for very low-level, low-level and short-lived intermediate-level radioactive waste of the Belarusian NPP. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 1, pp. 105–118 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-1-105-118>
6. Tsebakovskaya N. S., Utkin S. S., Kapyrin I. V., Medyantsev N. V., Shamina A. V. *Review of Foreign Practices of SNF and RW Disposal*. Moscow, Komtekhprint Publ., 2015. 208 p. (in Russian).
7. Poinssot C., Baeyens B., Bradbury M. H. Experimental and modelling studies of caesium sorption on illite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, vol. 63, no. 19–20, pp. 3217–3227. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00246-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00246-X)
8. Semenkova A. S., Evsiunina M. V., Verma P. K., Mohapatra P. K., Petrov V. G., Seregina I. F., Bolshov M. A., Krupskaya V. V., Romanchuk A. Yu., Kalmykov S. N. Cs⁺ sorption onto Kutch clays: Influence of competing ions. *Applied Clay Science*, 2019, vol. 166, pp. 88–93. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.09.010>
9. Bulgakov A. A., Konoplev A. V. Modeling of long-term transformation of ⁹⁰Sr forms in soils. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*, 2005, no. 7, pp. 825–831 (in Russian).
10. Putilina V. S., Galitskaya I. V., Yuganova T. I. *Sorption Processes in Groundwater Pollution with Heavy Metals and Radioactive Elements. Strontium: Analytical Review*. Novosibirsk, State Public Scientific and Technical Library of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2013. 95 p. (in Russian).
11. Belitskii A. S., Orlova E. I. *Protection of Groundwater from Radioactive Contamination*. Moscow, Medicina Publ., 1968. 209 p. (in Russian).