

ОПЫТ ИЗУЧЕНИЯ ГЛИНИСТЫХ ТОЛЩ И КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАССИВОВ КАК ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД ДЛЯ ОКОНЧАТЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ РАО

В. Г. Румынин

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, СПб отделение;
Институт наук о Земле СПбГУ, Санкт-Петербург

Статья поступила в редакцию 19 сентября 2017 г.

Анализируются инженерно-геологические и гидрогеологические проблемы безопасной изоляции РАО при их размещении в двух типах горных пород – глинах и гнейсах в контексте подобных исследований на некоторых зарубежных объектах. Показаны диапазоны изменений основных физических параметров, контролирующих транспорт радионуклидов подземными водами («дальняя зона») в постэксплуатационный период. Обсуждаются результаты моделирования геомиграции радионуклидов и водорода (как продукта коррозии металлических контейнеров) в растворенной и газовой фазе с учетом температурного разогрева кристаллического массива.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, физические свойства пород, фильтрация подземных вод, миграция радионуклидов и газовой фазы.

Введение

Большие экономические затраты и рост экологических рисков, связанных с хранением «исторических» РАО и их накоплением в современных ядерно-технологических и энергетических производствах, послужили основанием для принятия в 2011 г. новой концепции обращения с РАО, оформленной в виде федерального закона. Согласно этой концепции должен осуществляться переход от хранения РАО к их захоронению – окончательной изоляции. Для средне- и низкоактивных отходов 3 и 4 классов в большинстве случаев экономически выгодным является строительство пунктов захоронения (ПЗРО) приповерхностного типа. Для отходов высокой и средней активности (1 и 2 классы) наиболее перспективным и безопасным в настоящее время считается создание пунктов окончательной изоляции РАО в глинистых и кристаллических породах, залегающих на относительно больших глубинах от поверхности, что согласуется с общемировым трендом.

Так, национальные исследовательские программы обращения с радиоактивными отходами Бельгии, Франции и Швейцарии ориентированы

во многом на изучение комплексов глинистых пород (Rupelian Boom Clay, Callovo-Oxfordian clayey siltstone/silty clay и Aalenian Opalinus Clay), в которых планируется создание хранилищ РАО (табл. 1). Как видно, глинистые формации представлены уплотненными или переуплотненными (до аргиллитов) глинами, в которых перспективными для захоронения являются интервалы глубин в несколько сотен метров. Эти интервалы вскрыты подземными горными выработками, в которых созданы подземные исследовательские лаборатории (ПИЛ) [1–4]. В табл. 1 представлена также общая геологическая информация о вендских (котлинских) глинах, широко распространенных на северо-западе РФ. Их комплексное изучение выполнялось в период 2007–2014 гг. с использованием буровых скважин ввиду неглубокого залегания.

Наиболее значимые результаты достигнуты при изучении кристаллических гранитогнейсовых массивов на территории Швеции (Stripa Mine, Äspö Hard Rock Laboratory), Финляндии (Olkiluoto Research Tunnel) и Швейцарии (Grimsel Test Site), где также, как и в упомянутых

Таблица 1. Геологическая характеристика участков захоронения РАО и ПИЛ в глинистых формациях

Страна	Бельгия	Франция	Швейцария	Россия
Название формации	Boom Clay (BC)	Callovo-Oxfordian (COx)	Opalinus Clay, Mont Terri (OPA)	Котлинские глины (Vkt)
Расположение	NRC Mol/Dessel	Meuse/Haute-Marne	Western Switzerland	Сосновый Бор, Северо-Запад РФ
Тип РАО	CAO, BAO, HAO	BAO	BAO, HAO	HAO, CAO
Глубина, м	> 200	450–500	400–800	70–100
Концепция: ПИЛ (URL), скважины	URL HADES, с 1984 г. (-223 м)	URL Bure, с 2004 г. (-490 м)	URL Mont Terri с 1996 г.	Скважины, с 2007 г.
Возраст, млн лет	29–33	152–158	180	530–650
Геологический период	Нижний олигоцен (Rupelian)	Средний келловей–нижний оксфорд	Нижний и средний аален	Венд
Литологическое описание	Уплотненные серые глины	Уплотненные аргиллиты	Переуплотненные глины, аргиллиты	Глины, аргиллиты

Таблица 2. Геологическая характеристика участков захоронения РАО и ПИЛ в кристаллических массивах

Участок / лаборатория	Вмещающая порода	Возраст пород	Глубина, м	Назначение участка	Гидродинамическая зона
Forsmark Швеция	Метаморфизованные биотитовые граниты	1,8–1,9 млрд лет	500	BAO, ОЯТ	
Äspö Швеция	Гранитоиды, мелкокристаллические граниты	1,6–1,7 млрд лет	200–460	Только ПИЛ	
Olkiluoto Финляндия	Мигматизированные гнейсы, пегматитовые граниты	1,8–1,9 млрд лет	450	ПИЛ, BAO, ОЯТ	
Grimsel Test Site Швейцария	Граниты, секущиеся дайками аплитов и лампрофиров	300 млн лет	450	Только ПИЛ	
Участок «Енисейский» Россия	Гнейсы, секущиеся дайками долеритов	1,8–2,5 млрд лет	400–500	ПИЛ, BAO, CAO	

выше глинистых толщ, на участках предполагаемого размещения объектов долговременной изоляции РАО и ОЯТ созданы ПИЛ (табл. 2) [4–7]. Эти объекты размещены в основном вблизи зоны разгрузки подземных вод в морские акватории. Основные защитные функции в этом случае выполняют инженерные барьеры, а горная порода лишь среда размещения; разбавление загрязняющих веществ в объеме морских вод служит дополнительной гарантией экологической безопасности.

В качестве российского аналога западноевропейских проектов, связанных с использованием подземного пространства, может рассматриваться проект создания пункта глубинного захоронения РАО (ПГЗРО) в Нижнеканском

гнейсовом массиве (табл. 2). Размещение объекта на водораздельном участке дает определенное преимущество в связи с тем, что, наряду с инженерным барьером, защитную функцию, сдерживающую загрязнение, будет выполнять породный массив, о чем будет сказано далее.

Одним из ключевых направлений при создании такого рода объектов является обоснование их долговременной безопасности (ОДБ), которая во многом определяется геомиграционными процессами в подземной гидросфере. Поэтому построению гидрогеологических моделей в мировой практике уделяется особое внимание. В свою очередь, надежность модельных прогнозов определяется полнотой и качеством исходной информации: структурой фильтрационного

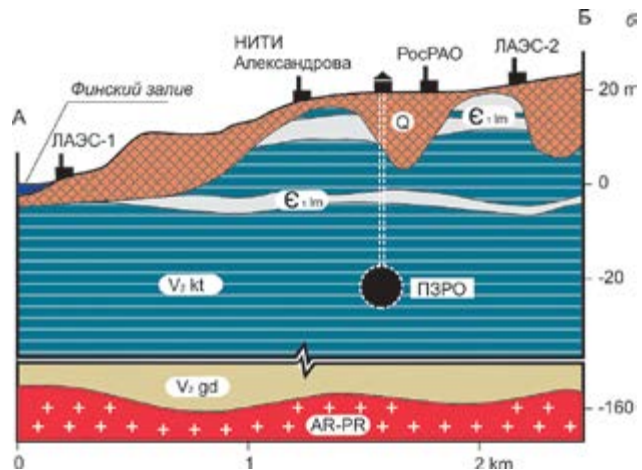


Рис. 1. (а) Расположение глубоких инженерно-геологических скважин на участках РосРАО и ЛАЭС-2 (1 – скважина и ее номер; 2 – трасса подземных горных выработок, 3 – гидроизогиписа верхнего водоносного комплекса; 4 – палеодолина). (б) Схематический геологический разрез по линии А–Б

потока, распределением в пространстве и характером тектонических нарушений сплошности массива, фильтрационными и миграционными (по отношению к радиоактивным растворам и газовой фазе) свойствами пород и др. [8].

Реализация концепции обращения с РАО, принятая в РФ в 2011 г., учитывает современные тенденции, более того, можно говорить об определенных успехах, достигнутых в плане изучения глинистых и кристаллических формаций, а также в развитии и апробации теоретических и экспериментальных подходов для ОДБ такого рода инженерных объектов. Данный вывод вытекает из анализа опыта изыскательских, проектных и научно-исследовательских работ в северо-западном регионе РФ, где широко распространены вендские и кембрийские глины, а также в Красноярском крае, на юге которого обнажаются архейские и протерозойские гранитоидные породы. Настоящая статья – небольшая иллюстрация задач, возникающих в связи с параметрическим и модельным обоснованием долговременной безопасности захоронения РАО в двух комплексах пород – глинистых и кристаллических. В ее основе опыт работ Института геоэкологии РАН в кооперации с рядом отечественных и зарубежных организаций, осуществляемых при поддержке предприятий Госкорпорации «Росатом» – ФГУП «НО РАО» и ФГУП «РосРАО».

1. ПЗРО в вендских глинах (Сосновоборский район Ленинградской области)

На северо-западе Русской платформы широкое распространение имеют глинистые породы высокой степени литификации. К ним относятся котлинские глины (V_2kt) вендской

системы, согласно перекрываемые синими нижнекембрийскими глинами (ϵ_1lm). Глины картируются вблизи поверхности в пределах полосы к югу от Финского залива и на Карельском перешейке, а также в районе Санкт-Петербурга и его окрестностях. В частности, глины служат основанием таких инженерных объектов как ЛАЭС и ЛАЭС-2, а также поверхностного хранилища ТРО РосРАО в районе г. Сосновый Бор (рис. 1) [9].

На предпроектной стадии при обосновании возможности строительства приповерхностного (до 100 м) ПЗРО в этом районе, в процессе изыскательских работ изучались свойства пород, которые можно условно подразделить на две группы [9]: (1) свойства, определяющие геотехнические условия строительства и эксплуатации хранилища; (2) свойства, контролирующие безопасность хранилища с точки зрения радиационного воздействия на подземные воды и сопредельные среды. Основной объем информации был получен в ходе бурения глубоких (до 180 м) скважин (рис. 1а). Дополнительно проводились геофизические исследования, направленные в частности для выделения древних погребенных долин (рис. 1б). Большой объем исследований выполнен в лабораторных условиях.

1.1. Водно-физические и физико-механические свойства

Анализ результатов лабораторного исследования керна позволил установить четкую закономерность в пространственном распределении физических и механических свойств изучаемой глинистой толщи [10]. Как следует из графиков на рис. 2а, верхняя зона (I) разреза (до глубин 40–50 м) представлена относительно влажными

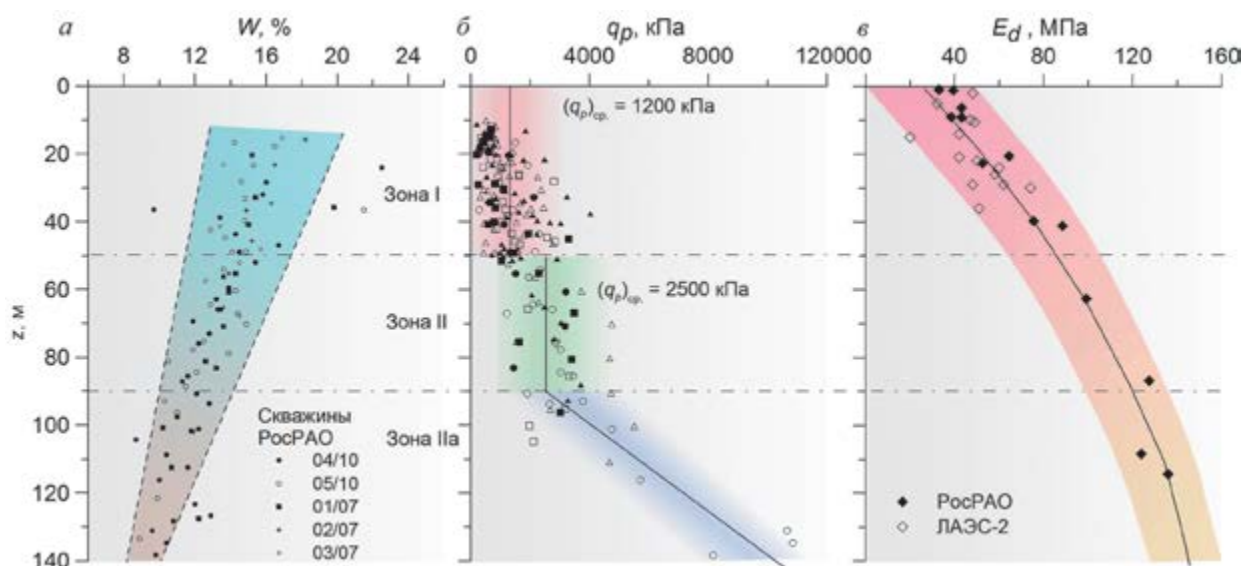


Рис. 2. Изменение влажности (а), девиаторного напряжения (б) и модуля общей деформации (в) по глубине

и разуплотненными породами. Нижняя зона (II) представлена более плотными и менее влажными породами.

Анализ данных стабилметрических испытаний выявил явную тенденцию увеличения крепости пород с глубиной (рис. 2б). С глубиной меняются также деформационные свойства пород. Так, рост модуля общей деформации (рис. 2в) говорит о снижении степени сжимаемости пород на больших глубинах (зона II) по сравнению с приповерхностной зоной (I). Эти данные подтверждают ранее выявленные тенденции [11, 12].

Выявленная пространственная изменчивость параметров позволила выбрать оптимальные глубины заложения подземных горных выработок.

1.2. Фильтрационные и геомиграционные свойства глин

Коэффициенты фильтрации котлинских глин изучались в приборах трехосного сжатия WF-50 на монолитах, ориентированных по двум взаимно перпендикулярным направлениям.

Таблица 3. Сводная таблица коэффициентов фильтрации котлинских глин

№ п.п.	№ скв.	Глубина, м	kII, м/сут	k, м/сут	Анизотропия
1	5/10	48,6–49,0	$6,00 \times 10^{-6}$	$1,30 \times 10^{-6}$	4,6
2	4/10	51,8–52,1	$4,00 \times 10^{-6}$	$6,00 \times 10^{-7}$	6,7
3	1/07	55,0–55,25	–	$5,00 \times 10^{-7}$	–
4	1/07	65,0–65,25	–	$5,00 \times 10^{-7}$	–
5	4/10	69,2–69,5	$1,90 \times 10^{-5}$	$1,40 \times 10^{-6}$	13,6
6	7/11	70,3–70,6	$2,17 \times 10^{-5}$	$1,30 \times 10^{-6}$	16,7
7	7/11	94,0–94,25	$2,20 \times 10^{-4}$	$1,96 \times 10^{-5}$	11,0

В результате проведенных поинтервальных исследований (табл. 3) удалось установить, что котлинские глины обладают относительно низкими фильтрационными свойствами. Так, коэффициент фильтрации по направлению напластования лежит в диапазоне от 5×10^{-7} до 2×10^{-5} м/сут, а значения по напластованию от 4×10^{-6} до 2×10^{-4} м/сут. Таким образом, выявлена сильная анизотропия параметра (до 16), которая объясняется тонкой слоистостью глинистых отложений.

Проведенные диффузионные эксперименты с радионуклидами в трех различных постановках (однокамерные, двухкамерные, 3D) позволили выявить диапазоны вариации коэффициентов молекулярной диффузии в котлинских глинах (табл. 4) на площадке предполагаемого строительства ПЗРО. Установленные значения в целом хорошо коррелируют с материалами зарубежных исследований на объектах-аналогах [3].

Также экспериментально установлена анизотропия диффузионных свойств среды. Поток вещества в среднем диффундирует в 2-6 раз быстрее вдоль напластования, нежели поперек,

Таблица 4. Средние эффективные коэффициенты молекулярной диффузии (D_e), м²/с

Тип эксперимента	3D эксперимент	Однокамерная ячейка	Двухкамерная ячейка
Cl-36	$5,91 \times 10^{-10}$	–	$1,40 \times 10^{-10}$
H-3	–	$3,05 \times 10^{-10}$	–
Sr-90	$4,54 \times 10^{-10}$	$1,51 \times 10^{-10}$	–
Co-60	$4,60 \times 10^{-11}$	$3,65 \times 10^{-11}$	–
Cs-137	–	$6,56 \times 10^{-11}$	–

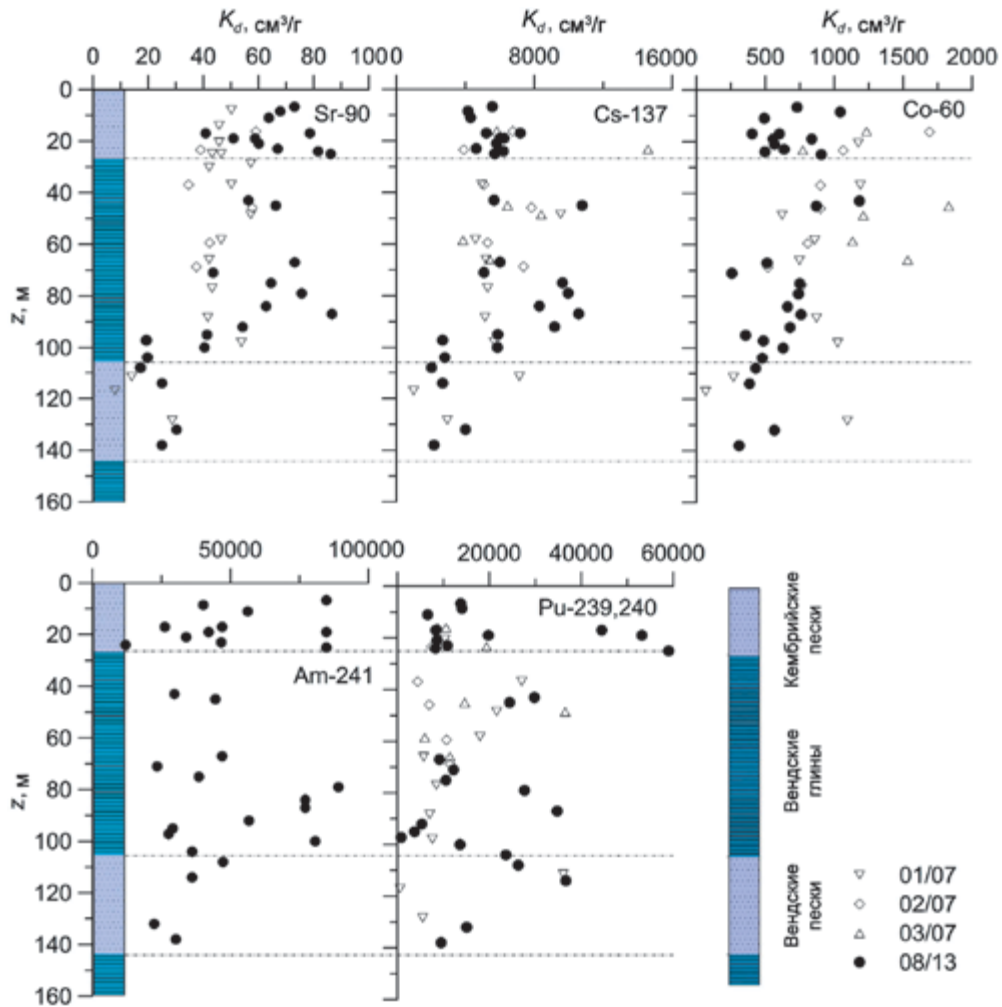


Рис. 3. Вариации коэффициента K_d ($\text{см}^3/\text{г}$) по мощности (Z , м) глинистой толщ.
Пунктир – зона опесчаненных глин.

что объясняется микрослоистой структурой котлинских глин [13]. Полученные эффективные коэффициенты молекулярной диффузии (D_e) для различных радионуклидов располагаются в ряд по убыванию: тритий > Sr-90 > Cs 137 > Co-60. Соответствующие значения D_e : $3,6 \cdot 10^{-10} > 2,3 \cdot 10^{-10} > 6,6 \cdot 10^{-11} > 3,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$.

Отобранные с различных интервалов пробы глин использовались в экспериментах по изучению сорбции таких радионуклидов, как Sr-90, Cs-137, Am-241, Pu-239, -240 [14]. Полученные диапазоны изменения коэффициента сорбционного распределения K_d для различных радионуклидов существенно различаются (рис. 3). Кроме того, отчетливо видно, что значения K_d , полученные для нижней зоны разреза (глубже 100 м), представленной вендскими песчаниками, заметно ниже. Наименее сорбируемым является Sr-90, наиболее – Am-241 и Pu-239, -240; Cs-137 занимает промежуточное положение.

Выполненные работы дают параметрическую основу для создания комплекса математических моделей. Моделирование миграционных процессов в рамках ОДБ позволило

оценить пространственно-временные масштабы диффузии в глинистой толще в постэксплуатационный период (штатный режим функционирования ПЗРО), а также оконтурить поля радиоактивного загрязнения вендского горизонта (аварийный сценарий, связанный с нарушением целостности массива пород). И в том и в другом случае воздействие не выходит за допустимые пределы [15].

1.3. Сравнение вендских глин (Vkt) с глинистыми формациями в Западной Европе (BC, COx и OPA)

Исследования, выполненные рядом организаций в странах Западной Европы, а также комплекс работ в Сосновоборском регионе, позволяют отнести изученные толщи (табл. 1) к средам, обладающих свойствами, благоприятными для захоронения радиоактивных отходов:

- низкие коэффициенты фильтрации;
- отсутствие потока воды вокруг отходов обуславливает малую скорость выщелачивания;
- преобладающим механизмом переноса радионуклидов является молекулярная диффузия;

- благоприятные физико-химические условия иммобилизации радионуклидов (малая растворимость);
- высокая сорбционная/удерживающая способность;
- способность к самозапечиванию, т. е. закрытию трещин и пустот (набухание глинистых минералов).

По результатам экспериментальных работ и сравнительного анализа опубликованных материалов для четырех формаций Vkt, BC, COx и OPA обнаруживаются следующие общие свойства:

- близкий минералогический состав;
- высокая сорбционная способность и обменная емкость;
- химическая среда от нейтральной до слабощелочной;
- преобладающий вид переноса – диффузионный.

Физико-химические и сорбционные свойства глин благоприятны для удержания радионуклидов. Для глин характерна медленная миграция радионуклидов в биосферу в течение длительного периода времени.

По результатам экспериментальных работ и сравнительного анализа между четырьмя формациями Vkt, BC, CO_x и OPA обнаруживаются следующие различия:

- пористость и влажность глин уменьшаются в зависимости от плотности в ряду Vkt >> BC >> OPA > CO_x;
- содержание карбонатов уменьшается в ряду CO_x > OPA >> BC, Vkt;
- общее солесодержание снижается в ряду OPA > CO_x > Vkt > BC;
- геомеханические свойства (твердость и сопротивление) CO_x (затвердевшая) > OPA >>> BC (пластичная) = Vkt (затвердевшая, непластичная). Прочность Vkt ниже, чем у CO_x и OPA;

- низкий коэффициент фильтрации (в скобках — десятичный порядок, м/с): Vkt-BC (-12) > OPA (-13) > CO_x (-14).

Таким образом, можно с уверенностью утверждать, что по основным параметрам котлинские глины отвечают «стандарту» глинистых пород, рассматриваемых в западной части Европы в качестве сред, вполне приемлемых для захоронения РАО.

2. ПГЗРО в гранитогнейсовом массиве (участок «Енисейский», Красноярский край)

Нижнеканский гранитоидный массив уже в начале 1990-х годов стал рассматриваться как достаточно перспективный с позиций его «изолирующих» свойств. Этот массив находится на сочленении двух крупных азиатских геологических структур — Западно-Сибирской и Восточно-Сибирской плит. В период с 1992 по 2005 гг. были выполнены различные геологические работы на нескольких участках. Перспективным для дальнейшего изучения был признан участок «Енисейский». Планомерное изучение этого участка началось в 2008 г. силами ОАО «Красноярскгеология» [16]. Общий объем бурения скважин глубиной 600–700 м превысил 7,5 тыс. погонных метров; из гидрогеологических скважин произведены поинтервальные откачки (через 50 м) — более 180 опытов; бурение скважин сопровождалось полным комплексом скважинного каротажа, включая расходомерию и резистивиметрию. Площадные (наземные) геофизические работы включали магнитную съемку, электроразведку методом ВЭЗ, а также сейсморазведочные работы.

В геоморфологическом отношении участок расположен на водоразделе двух рек — Енисея и

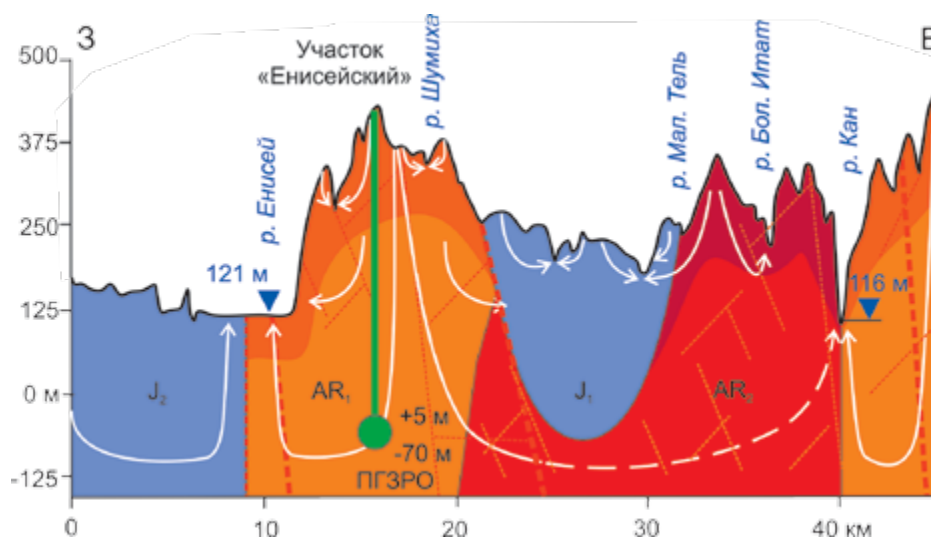


Рис. 4. Схематический геологический профиль (З-В) через участок «Енисейский» (ПГЗРО). Стрелки – линии тока (схематично) в зоне активного и замедленного водообмена

Кана. ПГЗРО размещается на глубинах 400–450 м от поверхности (а. о. +5...–70 м) в пределах Нижнеканского гидрогеологического массива трещинных и трещинно-жильных вод (рис. 4), в котором выделяются два типа фильтрационных потоков: региональный поток подземных вод, контролируемый разгрузкой в региональные дрены — реки Енисей и Кан; локальные потоки подземных вод, контролируемые локальными формами рельефа и разгружающиеся в реки второго и третьего порядка. Доказательство разделения потоков в верхней и нижней зонах водоносной толщи — одна из задач модельного анализа в рамках ОДБ.

С другой стороны, приемлемость создания ПЗРО определяется проницаемостью массива. Интерпретация поинтервальных гидрогеологических опробований указывает, что коэффициент фильтрации убывает с глубиной [16]. На глубинах 0–100 м наиболее часто отмечаются коэффициенты фильтрации 5×10^{-3} м/сут, а в интервале 100–200 м средние значения уже в 5 раз меньше. Глубже 200 м происходит постепенная стабилизация значений коэффициента фильтрации в пределах $(1...5) \times 10^{-4}$ м/сут.

Данные гидрогеологической разведки послужили основой для создания 3D математической модели объекта (рис. 5) на основе предпосылки эквивалентной пористой среды на базе программного кода MT3DMS [17]. Калибровка модели осуществлялась путем сопоставления модельных расчетов с данными гидрогеологического опробования толщи, мониторинга распределения напоров, а также с гидрографами рек.

Моделирование показало, что река Шумиха, а также ручьи Безымянный и Студеный оказывают дренирующее влияние на водоносные породы только в верхней части разреза (рис. 6). На более низких абсолютных отметках, в частности совпадающих с проектными отметками заложения инженерного объекта (ПГЗРО), такое влияние отсутствует: подземные воды транзитом проходят этот участок и разгружаются в р. Енисей.

В ПГЗРО планируется размещение отходов 2 класса в горизонтальных горных выработках, а 1 класса (тепловыделяющие РАО) — в вертикальных скважинах. Перечень радионуклидов, потенциально участвующих в загрязнении подземных вод в постэксплуатационный период, довольно широк (I-129, Sr-90, H-3, Tc-99, Se-79, U-238, Cs-137, Cs-135, Am-243, Pu-239). Наряду с тепловыделением возможна газогенерация за счет коррозии материалов.

Для изучения сорбционного взаимодействия растворенных радионуклидов и породного материала было выполнено два типа экспериментов: (1) сорбция радионуклидов на дисперсном материале, заполняющим межтрещинное пространство (определение K_D , см³/г); (2) сорбция радионуклидов на поверхностях трещин

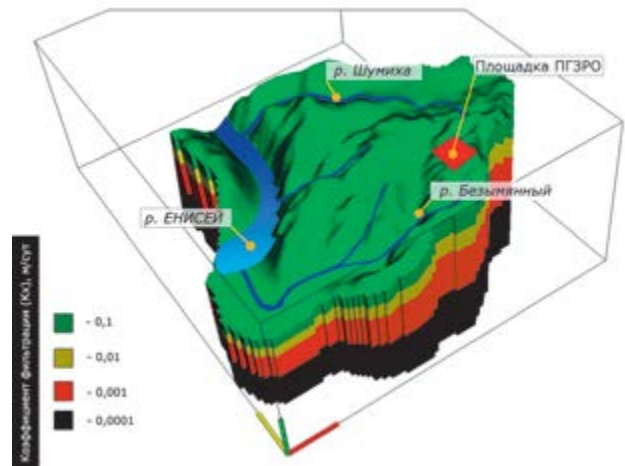


Рис. 5. Концептуальная схема 3D гидрогеологической модели

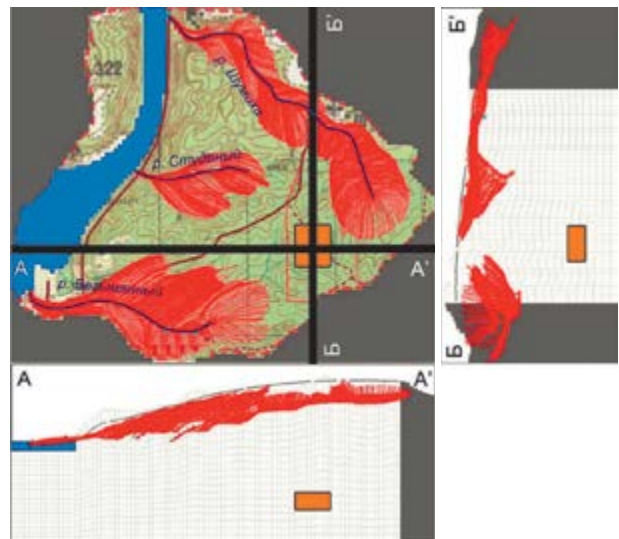


Рис. 6. Зоны захвата инфильтрационных вод поверхностными водотоками (прямоугольник — условный контур объекта)

(монокристаллических фрагментах пород) коэффициентом распределения (K_d , см) (рис. 7).

Как показало моделирование, сорбция и радиоактивный распад являются факторами, сдерживающими радиоактивное загрязнение подземных вод (рис. 8). Так, за счет малого периода полураспада и заметной сорбции Cs-137 остается практически в границах горной выработки. Большой период полураспада Pu-239, несмотря на его высокую сорбируемость, имеет довольно выраженный ореол. В свете сказанного наиболее опасными являются слабосорбируемые и долгоживущие радионуклиды, такие как I-129, Se-79 и Tc-99, о чем свидетельствуют пример расчета ореола Se-79 на рис. 8.

На заключительном этапе, в рамках решения сопряженной задачи двухфазной фильтрации

Захоронение радиоактивных отходов

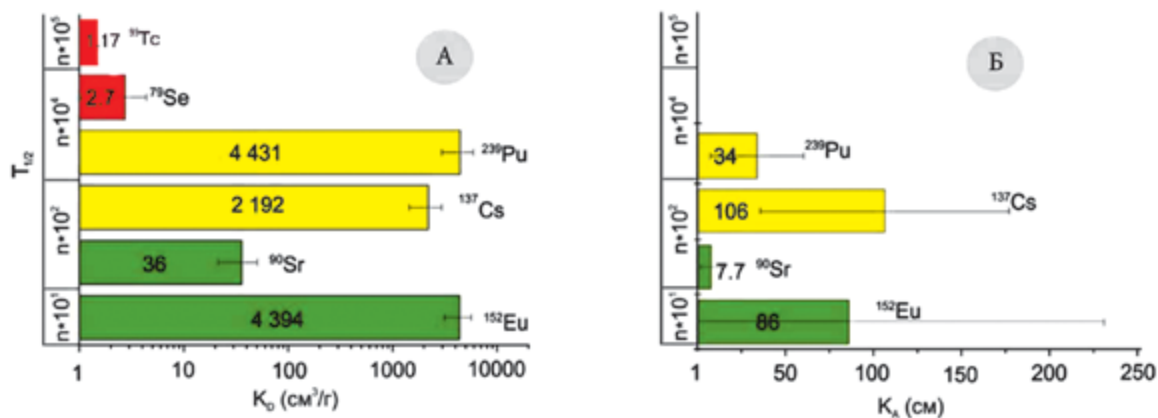


Рис. 7. Коэффициенты сорбционного распределения изотопов ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ⁷⁹Se, ⁹⁹Tc, ¹⁵²Eu, ²³⁹Pu, определенные экспериментально: А – на измельченном материале-заполнителе трещин во вмещающих породах; Б – на поверхностях трещин монолитных образцов вмещающих пород

и теплопереноса, выполнялся прогноз последствий газогенерации и тепловыделения. Необходимость обращения к двухфазным моделям объясняется: (1) проявлением эффекта всплывания газа как более легкой фазы, (2) различиями в фазовой проницаемости массива (для газа и воды); (3) растворением газа в воде и его быстрым транспортом в растворенной форме. Фильтрационная структура модели, созданная на основе программного кода TOUGH2 [18], унаследовала основные черты ранее рассмотренной модели. Интенсивность продуцирования водорода, как наиболее вероятного газа, рассчитывалась в рамках специализированных программ. Тепловыделение происходит за счет радиоактивного распада, мощность соответствующего источника рассчитывалась по суммарной активности различных радионуклидов.

Расчеты показали, что тепловыделение в хранилище характеризуется затухающей во времени экспоненциальной функцией. Максимальная температура в ПЗРО, достигаемая через 55-65 лет после закладки РАО, составляет 80-90°C. Тепловой ореол в массиве имеет сферическую форму на протяжении всего времени, что свидетельствует о доминировании в кристаллическом массиве механизма кондуктивного (диффузионного) теплопереноса над конвективным. Размеры теплового ореола менее 100 м. Формируемая тепловым полем циркуляционная ячейка не влияет существенно на поле скоростей фильтрации (рис. 9), так что выполненные ранее миграционные расчеты в изотермической постановке не нуждаются в серьезных коррективах.

Результаты моделирования показывают, что газовая фаза распространяется от ПЗРО в вертикальном направлении, практически не выходя за его периметр. Примерно за 100 лет ореол нерастворимого водорода стабилизировался, поднявшись на абсолютные отметки 220 м — около 200 м ниже земной поверхности. Насыщенность водорода незначительная. Выхода

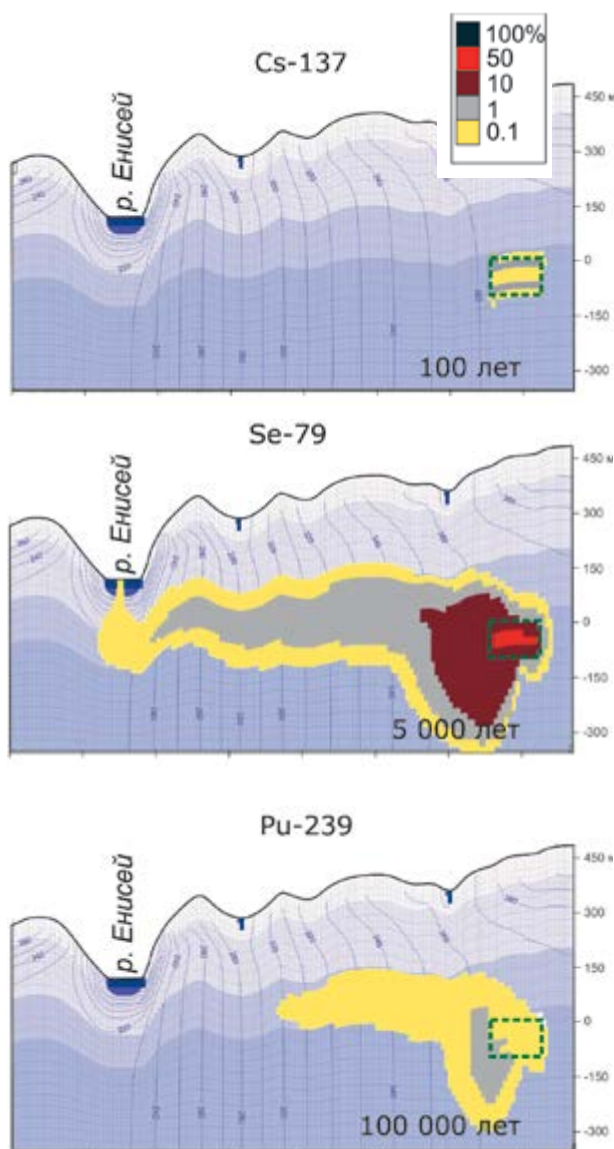


Рис. 8. Конфигурация ореолов загрязнения подземных вод радионуклидами в относительных концентрациях; время указано с момента выхода за пределы системы инженерных барьеров

газа на дневную поверхность не происходит, он переходит в растворенную форму.

Растворенная газовая фаза (рис. 10) представляет наибольший интерес, поскольку масштаб распространения растворенной части водорода значительно превышает ореол распространения газовой фазы. Моделирование показывает, что в верхних (более проницаемых) частях разреза растворенный водород вовлекается в

движение вместе с подземными водами в преимущественно горизонтальном направлении.

Заключение

Таким образом, предварительный анализ указывает на отсутствие факторов, являющихся неблагоприятными с позиций ОДБ двух рассмотренных объектов. Повышению достоверности данного вывода может послужить дальнейшее изучение геолого-гидрогеологических условий, механизмов и параметров, контролирующих перенос радионуклидов в массиве горных пород, а также развитие математического аппарата.

При обосновании строительства ПЗРО на относительно небольших глубинах в глинистых толщах (условия Сосновоборского района) актуальным является геомеханическое моделирование подработки водоносных горизонтов, залегающих в кровле глин, для прогнозирования развития техногенной трещиноватости над горными выработками.

Для ПЗРО в Нижнеканском гранитогнейсовом массиве представляется целесообразным развитие сети режимных скважин за пределами размещения объекта для изучения общей структуры фильтрационных потоков, а также водного баланса территории. Принципиальным является использование и разработка моделей нового поколения, учитывающих невыполнение принципа континуума («дискретный/ каналový» характер течения жидкости и газа в трещиноватой среде).

Так, для обоснования всех проектных решений необходима интеграция локальных моделей процессов в инженерном объекте (ближняя зона) и мелкомасштабной региональной модели (дальняя зона), а также калибровка моделей с использованием дополнительной информации (изотопы, гидрология, ДДЗ), сопровождающая анализом чувствительности. Особое значение имеет учет физико-химических преобразований, многокомпонентности раствора, в частности коллоидных форм.

Благодарности

Автор выражает благодарность за поддержку данной работы ряду подразделений ГК «Росатом», прежде всего ФГУП «НО РАО» и ФГУП «РосРАО». Автор признателен также за сотрудничество специалистам производственных и научных организаций ОАО «Красноярскгеология», ИБРАЭ РАН, НИТИ им. А. П. Александрова, ИФХЭ РАН, ИГЕМ РАН.

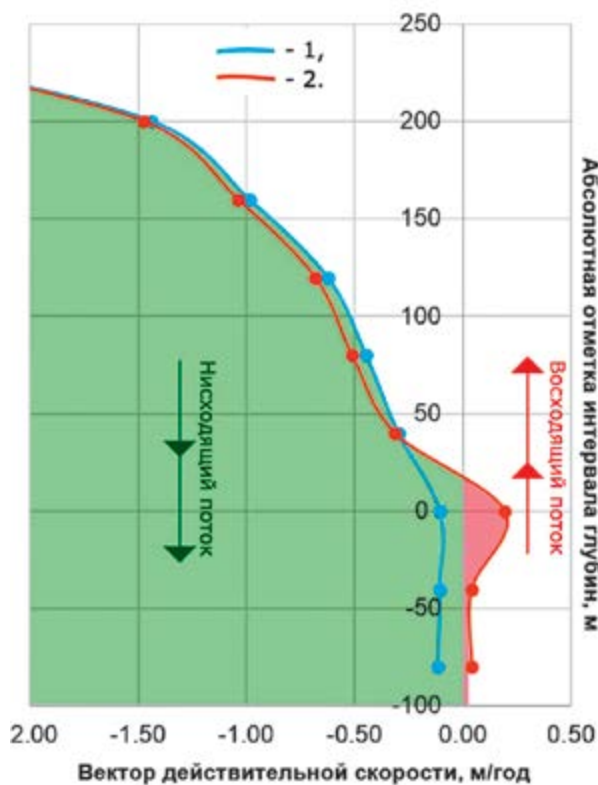


Рис. 9. Профиль вектора скорости фильтрации без учета (кривая 1) и с учетом (кривая 2) тепловой конвекции

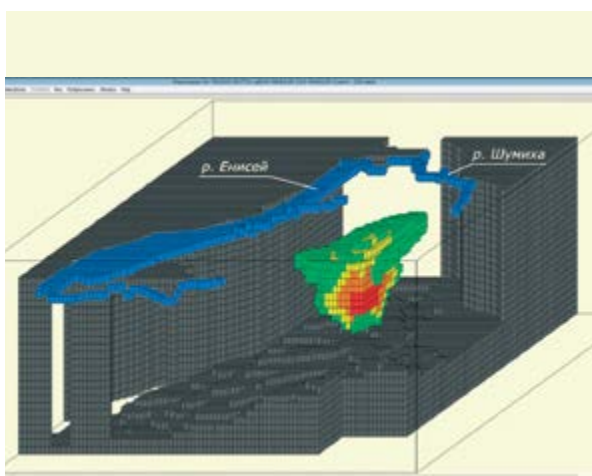


Рис. 10. Ореол загрязнения подземной гидросферы водородом (растворенная форма)

Литература

1. *Arnould M.* Discontinuity networks in mudstones: a geological approach. Implications for radioactive wastes isolation in deep geological formation in Belgium, France, Switzerland // *Bull. of Eng. Geol. and the Envir.* — 2006. — Vol. 65. — P. 413–422.
2. *Bock H., Blümling P., Konietzky H.* Study of the micro-mechanical behavior of the Opalinus Clay: an example of co-operation across the ground engineering disciplines // *Bull. of Engin. Geol. and the Envir.* — 2006. — Vol. 65. — P. 195–207.
3. *Huysmans M., Dassargues A.* Stochastic analysis of the effect of spatial variability of diffusion parameters on radionuclide transport in a low permeability clay layer // *Hydrogeol. Journ.* — 2006. — Vol. 14. — P. 1094–1106.
4. *Delay J., Bossart P., Ling L.X.* Three decades of underground research laboratories: what have we learned? / Geological Society, London, Special Publications. — 2014; doi 10.1144/SP400.1.
5. SKB 2006. Data report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-25. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Sweden.
6. Posiva 2010. Models and Data Report. POSIVA 2010-01. Posiva Oy, 2010, Olkiluoto, Finland.
7. SKB 2017. Äspö site descriptive model Geological single-hole interpretation of KAS04, KAS06 and KAS08. Svensk Kärnbränslehantering AB Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
8. *Румынин В. Г., Никуленков А. М., Синдаловский Л. Н., Шварц А. А.* Гидрогеологическое моделирование и его параметрическое обеспечение при обосновании долговременной безопасности пунктов окончательной изоляции РАО в геологических формациях // *Материалы X Российской конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях.* — М.: ИБРАЭ РАН. — 2015. — С. 111–121.
9. *Румынин В. Г.* Геомиграционные модели в гидрогеологии. — СПб: Наука. — 2011.
10. *Румынин В. Г., Никуленков А. М.* Зональность физических свойств котлинских глин вендской системы (северо-запад Русской платформы) // *Записки Горного института.* — 2012. — Том 197. — С. 191–196.
11. *Ломтадзе В. Д.* Исследования деформируемости кембрийских глин, вскрываемых горными выработками Ленинградского метрополитена: Отчет / Ленинградский горный институт. — 1957.
12. *Дашко Р. Э.* Инженерно-геологическая и геоэкологическая оценка нижнекембрийских синих глин как среды размещения радиоактивных отходов // *Геоэкология.* — 2006. — № 3. — С. 235–241.
13. *Панкина Е. Б., Румынин В. Г., Никуленков А. М. и др.* Анизотропия глин при диффузионном переносе радионуклидов // *Радиохимия.* — 2010. — Т. 52. — № 6. — С. 532–538.
14. *Rumynin V. G., Nikulenkov A. M.* Geological and physicochemical controls of the spatial distribution of partition coefficients for radionuclides (Sr-90, Cs-137, Co-60, Pu-239,240 and Am-241) at a site of nuclear reactors and radioactive waste disposal (St. Petersburg region, Russian Federation) // *Journal of Environmental Radioactivity.* — 2016. — Vol. 162-163. — Pp. 205–218.
15. *Мальковский В. И., Пэк А. А., Румынин В. Г., Никуленков А. М.* Оценка безопасности подземного хранилища радиоактивных отходов в районе Ленинградской АЭС // *Атомная энергия.* — 2013. — Том 114. — № 4. — С. 206–211.
16. *Озерский А. Ю., Караулов В. А.* Гидрогеологические исследования при изысканиях массива кристаллических пород для подземного строительства в южной части Енисейского кряжа // *Инженерные изыскания.* — 2012. — № 11. — С. 52–59.
17. *Zheng C.* MT3DMS. A modular three-dimensional multispecies transport model (v.5.3) / University of Alabama. — 2010.
18. *Pruess K., Oldenburg C., Moridis G.* TOUGH2 – User’s guide. v.2.0, LBLN-43134. — 1999.

Информация об авторе

Румынин Вячеслав Геневич, член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, директор, Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН (199004, Санкт-Петербург, Средний пр., д. 41), e-mail: rumynin@hgepro.ru.

Библиографическое описание данной статьи

В. Г. Румынин. Опыт изучения глинистых толщ и кристаллических массивов как геологических сред для окончательной изоляции РАО // *Радиоактивные отходы.* — 2017. — № 1 (1). — С. 42–53.

EXPERIENCE OF STUDYING THE CLAY MASSES AND CRYSTALLINE CORE-AREAS AS GEOLOGICAL ENVIRONMENT FOR RW FINAL ISOLATION

Vyacheslav G. Rumynin

Institute of Environmental Geology, Saint Petersburg Div.;
Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

Article received 19 September 2017

Engineering geological and hydrogeological problems of radioactive waste final disposal into deep clay or gneiss rocks are considered in the context of international activity on several sites of that kind. Ranges of main physical parameters controlling radionuclide transport in groundwater ("far field") in post-operation period are shown. Modeling results of radionuclide and hydrogen (as the metallic container corrosion product) mass transport both in dissolved and gas phases with due account for the rock massif temperature heating are discussed in the paper.

Keywords: radioactive waste, physical properties of the rock, groundwater flow, subsurface radionuclide transport and gas flow.

References

1. *Arnould M.* Discontinuity networks in mudstones: a geological approach. Implications for radioactive wastes isolation in deep geological formation in Belgium, France, Switzerland // *Bull. of Eng. Geol. and the Envir.* 2006. Vol. 65. P. 413–422.
2. *Bock H., Blümling P., Konietzky H.* Study of the micro-mechanical behavior of the Opalinus Clay: an example of co-operation across the ground engineering disciplines // *Bull. of Engin. Geol. and the Envir.* 2006. Vol. 65. P. 195–207.
3. *Huysmans M., Dassargues A.* Stochastic analysis of the effect of spatial variability of diffusion parameters on radionuclide transport in a low permeability clay layer // *Hydrogeol. Journ.* 2006. Vol. 14. P. 1094–1106.
4. *Delay J., Bossart P., Ling L. X.* Three decades of underground research laboratories: what have we learned? Geological Society, London, Special Publications. 2014; doi 10.1144/SP400.1.
5. SKB 2006. Data report for the safety assessment SR-Can. SKB TR-06-25. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Sweden.
6. Posiva 2010. Models and Data Report. POSIVA 2010-01. Posiva Oy, 2010, Olkiluoto, Finland.
7. SKB 2017. Äspö site descriptive model Geological single-hole interpretation of KAS04, KAS06 and KAS08. Svensk Kärnbränslehantering AB Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
8. *Rumynin V. G., Nikulenkov A. M., Sindalovskij L. N., Shvarc A. A.* Gidrogeologicheskoe modelirovanie i ego parametricheskoe obespechenie pri obosnovanii dolgovremennoj bezopasnosti punktov okonchatel'noj izolyacii RAO v geologicheskikh formacijah / *Materialy yubilejnoj X Rossijskoj konferencii «Radiacionnaya zashchita i radiacionnaya bezopasnost' v yadernyh tekhnologiyah.* – M.: IBRAEH RAN. – 2015. – S. 111–121.
9. *Rumynin V. G.* Geomigracionnye modeli v gidrogeologii. – SPb: Nauka. – 2011.
10. *Rumynin V. G., Nikulenkov A. M.* Zonal'nost' fizicheskikh svojstv kotlinskih glin vendskoj sistemy (severo-zapad russkoj platformy) // *Zapiski Gornogo instituta.* – 2012. – Tom 197. – S. 191–196.
11. *Lomtadze V. D.* Issledovaniya deformiruемости kembrijskih glin, vskryvaemyh gornymi vyrabotkami Leningradskogo metropolitena: Otchet, Leningradskij gornyj institut. 1957.
12. *Dashko R. E.* Inzhenerno-geologicheskaya i geoekologicheskaya ocenka nizhnekembrijskih sinih glin kak sredy razmeshcheniya radioaktivnyh othodov // *Geoekologiya.* – 2006. – № 3. – S. 235–241.
13. *Pankina E. B., Rumynin V. G., Nikulenkov A. M., Gluhova M. P., Epimahov V. N., Mysik S. G., Baev M. N., Kobekov V. V., Degtev V. F.* Anizotropiya glin pri

diffuzionnom perenose radionuklidov // Radiohi-miya. – 2010. – T. 52. – № 6. – S. 532–538.

14. Rumynin V. G., Nikulenkov A. M. Geological and physicochemical controls of the spatial distribution of partition coefficients for radionuclides (Sr-90, Cs-137, Co-60, Pu-239,240 and Am-241) at a site of nuclear reactors and radioactive waste disposal (St. Petersburg region, Russian Federation) // Journal of Environmental Radioactivity. 2016. S. 162-163:205–18.
15. Mal'kovskij V. I., Pehk A. A., Rumynin V. G., Nikulenkov A. M. Ocenka bezopasnosti podzemnogo hranilishcha radioaktivnyh othodov v rajone Leningradskoj AEHS // Atomnaya ehnergiya. – 2013. – Tom. 114. – № 4. – S. 206–211.
16. Ozerskij A. Yu., Karaulov V. A. Gidrogeologicheskie issledovaniya pri izyskaniyah massiva

kristallicheskih porod dlya podzemnogo stroitel'stva v yuzhnoj chasti Enisejskogo kryazha // Inzhenernye izyskaniya. – 2012. – № 11. – S. 52–59.

17. Zheng C. MT3DMS. A modular three-dimensional multispecies transport model (v.5.3). University of Alabama. 2010.
18. Pruess K., Oldenburg C., Moridis G. TOUGH2 – User's guide. v.2.0, LBLN-43134. 1999.
19. Mackay J. R. Pingo Growth and collapse. Tuktoyaktuk Peninsula Area, Western Arctic Coast, Canada: a long-term field study. Géographie physique et Quaternaire, 1998, vol. 52, no. 3, pp. 1–53.
20. May D. A., Monaghan J. J. Can a single bubble sink a ship? American J. of Physics, 2003. vol. 71, iss. 9, pp. 842–849.

Information about the author

Rumynin Vyacheslav Genievich, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Director of the Saint-Petersburg Division of the RAS Environmental Geoscience Institute named after Sergeev E.M. (41, Sredniy Road, Saint-Petersburg, 199004), e-mail: rumynin@hgepro.ru

Bibliographic description

Rumynin V. G. Experience of Studying the Clay Masses and Crystalline Core-areas as Geological Environment for RW Final Isolation // Radioactive Waste. – 2017. – № 1. – pp. 42–53. (In Russian).