

### МЕЖДУНАРОДНАЯ КООПЕРАЦИЯ ПО ГЕОЛОГИЧЕСКОМУ ЗАХОРОНЕНИЮ РАО В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ (КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ КЛУБ)

Е. А. Савельева

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 17 апреля 2019 г.

*Статья основана на материалах, представленных на 2-м совещании Кристаллического клуба (CRC/IGSC/NEA OECD). В ней рассматриваются актуальные вопросы создания и эксплуатации подземной исследовательской лаборатории в кристаллическом массиве на примере жизненного цикла ПИЛ в Мицунами (Япония). Кроме того, рассмотрен важный вопрос моделирования переноса радионуклидов в системе трещин. Стохастическая дискретная сеть трещин моделируется на основе натурных данных. Миграция радионуклидов выполняется в этой дискретной сети, а также в модели эквивалентной пористости среды, построенной на ее основе.*

**Ключевые слова:** кристаллическая порода, сеть трещин, моделирование, подземная исследовательская лаборатория (ПИЛ), этапы развития ПИЛ, исследования в ПИЛ.

Пункты глубинного захоронения радиоактивных отходов (РАО), как правило, планируются для изоляции наиболее опасных радиоактивных отходов от биосферы, при этом используют комбинацию инженерных и естественных барьеров. Одним из типов геологических формаций, пригодных для геологических захоронений, считаются кристаллические горные породы. Именно эта формация выбрана Россией. Соответствующие породы характеризуются высокой прочностью, низкой чувствительностью к нагреванию, низкой водопроницаемостью и растворимостью. Хотя наличие трещин характерно для всех кристаллических пород, проводимость по трещинам может быть изменена с помощью инженерных барьеров, таких как матрица РАО и слабопроницаемые буферные материалы.

Многие страны рассматривают возможность создания объектов для геологического захоронения РАО в кристаллических породах. И хотя

к настоящему времени о них накоплены достаточно обширные научные и инженерно-геологические знания, еще существуют области, требующие исследований. Для объединения усилий в планировании и выполнении исследований, а также анализе и интерпретации результатов в 2017 году в Агентстве по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (АЯЭ ОЭСР) при объединенной группе по обоснованию безопасности (Integration Group for the Safety Case — IGSC) был создан Кристаллический клуб (Crystalline Club — CRC) [1].

Основная задача Кристаллического клуба состоит в организации обмена информацией, включая развитие подходов/методов для экспериментальных исследований и численного моделирования, призванных улучшить понимание свойств кристаллических пород в аспекте их использования как вмещающей среды для захоронения высокоактивных отходов (ВАО).

Именно для этого клубом готовится к публикации сборник «Отчет о состоянии исследований и разработок по изучению глубоких геологических захоронений в кристаллических породах в странах-участницах Кристаллического клуба» («Report on Status of R&D in CRC Countries Investigating Deep Geologic Disposal in Crystalline Rock»).

Сборник, помимо введения и заключения, будет содержать 5 глав, посвященных:

- Международным исследовательским проектам по изучению кристаллических пород как вмещающей среды для пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО), а также особенностям концепций захоронения, нормативным правилам и требованиям, опыту исследований в различных странах.
- Методикам натуральных исследований кристаллических массивов, включая технологические аспекты работ и исследований, сопровождающих горнопроходческие работы (например, сооружение бетонной крепи при выполнении проходки вертикальных стволов и горизонтальных галерей, характеризацию зоны структурных нарушений), а также соответствующие эксперименты, выполняемые в подземных исследовательских лабораториях (ПИЛ). Рассматриваются также технологии закрытия ПГЗРО, такие как пломбирование проходов и заполнения пустот в ячейках захоронения.
- Функциям безопасности геосферы и требованиям к свойствам вмещающей кристаллической породы для благоприятного взаимодействия с материалами инженерных барьеров. Рассматриваются термические, гидрогеологические, механические и химические условия, благоприятные с точки зрения наиболее длительного сохранения защитных свойств геологической среды и инженерных барьеров безопасности (ИББ), и особенно основного элемента ИББ — бентонитового буфера.
- Подходам и программным средствам для проведения моделирования процессов в системе ИББ и геологической среде при оценке безопасности ПГЗРО. Наибольшее внимание уделено средствам моделирования систем трещин и переносу радионуклидов в трещиноватой среде.
- Учету неопределенностей при моделировании. При этом основным источником неопределенностей считается система трещин.

В 2018 г. совещание Кристаллического клуба происходило в Японии на площадке подземной исследовательской лаборатории Мицунами. Кроме вопросов, связанных с подготовкой

упомянутого сборника, на совещании было два тематических заседания, посвященных японской ПИЛ в гранитах (Мицунами), а также проблемам, связанным с изучением и моделированием процессов движения подземных вод и миграции загрязнителей в трещиноватых массивах.

### Организация строительства и эксплуатации ПИЛ Мицунами

ПИЛ Мицунами расположена в центре Японии в районе города Мицунами, префектура Гуфу, на площадке, где уже проводились исследования местного геофизического центра и имелись 4 неглубокие (300 м) исследовательские скважины. Она является ПИЛ общего назначения, то есть на ее месте не предполагается создание ПГЗРО. Целями создания ПИЛ Мицунами было [2]:

- проведение исследований гранитного массива и разработка методики для проверки пригодности технологий геологического захоронения в кристаллической породе (гранитах);
- развитие метода оценки и обоснования безопасности глубинного захоронения на основе исследований в ПИЛ;
- демонстрация населению обоснованности выводов относительно реализуемости геологического захоронения РАО.

Геонаучные исследования, направленные на решение основных задач проекта ПИЛ, выполнялись в 3 этапа, соответствующих этапам жизненного цикла ПИЛ. Кроме того, можно отметить, что в ПИЛ Мицунами на практике применен итеративный подход к изучению геологической среды. На каждом этапе повторяются одна и та же последовательность действий, а именно: концепция — планирование — исследования — анализ и моделирование — оценка, но с учетом вновь полученной информации [2].

Этап 1. Наземная стадия исследования, она же стадия подготовки к строительным работам. На этом этапе основными задачами были, во-первых, создание геологической, гидрогеологической, геохимической и механической моделей вмещающей геологической среды на основе результатов различных исследований, выполняемых на поверхности. При этом определялись наиболее информативные в данных условиях методы исследований. Во-вторых, разработка подробной концепции проекта предполагаемого к строительству объекта, включая план подземных сооружений. В-третьих, разработка подробного плана исследований следующего этапа.

Первичное понимание геологического строения участка было сформировано на основании анализа имевшейся геологической информации о регионе, в том числе по ранее проведенным специальным исследованиям об урановых месторождениях, что связано с наличием в местных гранитах оксида урана. На этом этапе были проведены следующие работы:

- обследование существующих скважин для получения информации о геологическом строении участка, оценки механических свойств породы и выделения структурных нарушений;
- геофизические исследования на поверхности с использованием электромагнитных и сейсмоакустических методов, которые проводились с целью выявления границ литологических неоднородностей и разломов;
- бурение 3 новых глубоких (1350 м) скважин для уточнения геологического строения массива и литологического состава слагающих его горных пород. Бурение проводилось с отбором ориентированного керна, образцы которого затем подвергались лабораторным исследованиям для определения механических, петрофизических, химических и сорбционных свойств гранита;
- проведение в скважинах механических тестов для определения напряжений в массиве;
- проведение томографических межскважинных обследований для выявления положения и геометрии неоднородностей;
- выполнение межскважинных гидравлических тестов для оценки гидравлических свойств массива и слагающих его горных пород.

На этом этапе была заложена основа системы гидрологического (поверхностных вод, а также напоров подземных вод в скважинах) и геохимического мониторинга.

Этап 2. Стадия строительства ПИЛ. На этом этапе модели геологической среды, разработанные на предыдущем этапе, модифицировались с учетом результатов исследований, сопровождающих горнопроходческие работы. При проведении строительных работ оценивалось их влияние на прилегающие геологические породы, а также эффективность используемых инженерных технологий, разрабатывался план экспериментов в ПИЛ.

Сооружение стволов осуществлялось буровзрывным методом, за одну отпалку проводилось дробление и экскавация породы, соответствующей проходке 1,5 погонных метров шахтного ствола. Через каждые две отпалки проводилось геологическое обследование и фотографирование стен шахтных стволов и

галерей, а затем их бетонирование и закупорка водоносных трещин с использованием различных материалов, в том числе битума.

Геологические обследования включали визуальное обнаружение и описание литологических неоднородностей и их границ, зон выветривания, распределения проводимых трещин, разломов и даек. Также осуществлялся отбор проб горных пород для лабораторных исследований: химического анализа, анализа петрографических и минералогических свойств основной породы и пород заполнения трещин и проб поровых вод для проведения геохимических анализов. Важным результатом являлся учет в геохимической модели распределения различных по геохимическому составу вод с глубиной.

Для мониторинга напряженно-деформационного состояния массива горных пород, определения зон концентрации напряжений на трещинах в стволах, проходках и специальных скважинах, пробуренных от стволов и галерей, были установлены глубинные репера.

Механические напряжения в массиве на разных глубинах оценивались методами гидроразрыва пласта, а также с использованием сейсмоакустических методов. Эти исследования проводились на удалении от исследовательских галерей, чтобы избежать влияния строительных работ.

Гидрогеологические исследования на этом этапе были направлены на изучение изменения гидравлических условий массива вследствие строительства [3]. Для этого оценивались водоприток в шахты и специальные скважины, пробуренные из исследовательских галерей, а также проводились гидравлические тесты.

Этап 3. Фаза проведения экспериментов в ПИЛ, или эксплуатационная стадия. На этом этапе продолжалось тестирование и модификация моделей вмещающей геологической среды с использованием результатов проведенных исследований, оценивалось влияние расширения исследовательских галерей на распределение напряжений в массиве, а также эффективность инженерных технологий, используемых на большой глубине.

В результате строительных работ было сооружено:

- 2 вертикальных ствола глубиной 500 м, в одном из них функционирует лифт, а в другом расположена лестница;
- галерея длиной 300 м на глубине 500 м;
- исследовательские камеры на глубине 100 и 300 м.

Также в процессе работ были оборудованы системы геодинамического, геохимического и гидравлического мониторинга.

На сооружение ПИЛ Мицунами затрачено \$ 3 млн.

Эксплуатационная стадия состояла в выполнении следующих исследований и экспериментов:

- Изучение технологий уменьшения притока грунтовых вод в галерею с применением герметизирующих смесей на основе цементов. В вертикальных стволах на разных уровнях и в горизонтальных галереях использовались разные составы цементирующей смеси. Проводилась оценка влияния цементных материалов на скорость водопритока.
- Трассерный эксперимент в галерее на глубине 300 м с использованием специально пробуренной скважины. Его результаты использовались для разработки модели сети трещин и моделирования массопереноса по ней.
- Разработка технологии заполнения и герметизации (пломбирования) галереи как часть методологии и технологии закрытия объекта. Эксперимент, в частности, состоял в наблюдении за восстановлением гидрологических и геохимических условий в граните.

Выполненные исследования оформлены в проект обоснования безопасности, как если бы предполагалось создание ПГЗРО на этом месте, и вынесены на международную экспертизу [4].

#### Натурные данные о геологической среде и их использование для моделирования миграции в трещиноватых средах

Понимание подземной сети трещин масштаба объекта является важной задачей при планировании размещения ПГЗРО. Данные о трещинах формируются на основе наблюдений в исследовательских скважинах, выработках и тоннелях. Такие данные всегда пространственно ограничены, и для интерполяции сети трещин и их свойств требуется стохастическая модель. Такие модели, разработанные в Японии (NUMO) и США (SNL), были представлены на совещании Кристаллического клуба соответствующими группами специалистов.

Для моделирования фильтрации и миграции в трещиноватой среде обеими группами была разработана дискретная сеть трещин (discrete fracture network — DFN) для области размером 100×150×100 м с тоннелем в центре. Параметры для модели основывались на реальных данных, полученных в ПИЛ Мицунами в ходе эксперимента по изучению технологии пломбирования галереи [4], а именно:

- по следам трещин, наблюдаемых на стенах тоннеля;
- следам трещин, наблюдаемых на стенках скважины, пробуренной параллельно тоннелю;
- значениям напоров, определенных в 6 интервалах скважины по результатам измерений, проведенных с использованием пакеров;
- результатам измерений водопритока в исследовательский участок тоннеля.

Для наблюдаемых на стенах трещин измерялись: положение, длина, падение, сдвиг, диапазон расхода. На стенах тоннеля было обнаружено 2023 трещины, по 146 из них наблюдался водоприток. Было сделано предположение, что трещины, которые не демонстрируют расход, являются или закрытыми, или изолированными от сети трещин.

Подходы к формированию модели несколько различались. Американскими специалистами было выделено 2 набора трещин с наблюдаемым расходом больше или меньше 1 л/мин [5]. Радиус трещин определялся на основе анализа длины следа. Было установлено, что распределение длин следов в этих наборах, включая неводопроводящие трещины, лучше всего описывается логнормальным распределением. При этом трещины с расходом больше 1 л/мин имеют средний радиус 3,9 м и стандартное отклонение 2,2 м, а трещины с меньшим расходом имеют средний радиус 1,4 м и стандартное отклонение 1,3 м. Было предположено наличие корреляции между эквивалентным радиусом трещины ( $R$ ), ее проводимостью ( $k$ ) и ее апертурой ( $b$ ):

$$k = \gamma_1 \cdot R^\omega,$$

$$b = \gamma_2 \cdot R,$$

где  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  и  $\omega$  — коэффициенты, калибруемые по наблюдаемым значениям притока в тоннеле. Для данных, полученных в ПИЛ Мицунами:  $\gamma_1 = 1,55 \cdot 10^{-12}$ ,  $\gamma_2 = 1,16 \cdot 10^{-5}$  и  $\omega = 2,3$ . Оценки проницаемости трещин были подтверждены сравнением с результатами пакерных тестов на трещинах, обнаруженных в скважине. Большие проницаемости получились в зонах, где трещина присутствует и в тоннеле, и в скважине.

Модель дискретной сети трещин включает:

- Трещины, наблюдаемые в тоннеле и скважине. Каждая из этих трещин имеет свое точно заданное место, но случайные свойства (радиус, проводимость, апертуру), характеристики распределений которых определены при анализе свойств наблюдаемых трещин.
- Стохастические трещины, сгенерированные на основании размера трещин, ориентации,

интенсивности и свойств, полученных при анализе трещин. Их положение различается для разных реализаций.

Японскими специалистами были выделены 3 типа трещин: проточные — расход более 1 л/мин, капаящие — расход более 0,1 л/мин и мокрые — расход менее 0,1 л/мин [6]. Для каждого из типов были определены статистические характеристики параметров: направления, длины, проницаемости. Для распределения длины использовался степенной закон:

$$f(r) = \frac{b-1}{1} \left(\frac{1}{r}\right)^b,$$

где  $r$  — радиус,  $b$  — фактор, который подбирается по натурным данным по длинам следов наблюдаемых трещин. Количество генерируемых трещин должно соответствовать наблюдаемой плотности. Проницаемость ( $T$ ) имеет общее распределение для всех типов трещин:

$$T = \log \text{norm}(\mu, \sigma) \cdot r^c,$$

где  $\mu$  и  $\sigma$  — параметры логнормального распределения, а  $c$  — степенной параметр. Все они подбирались таким образом, чтобы соответствовать локальной гидравлической проводимости породы.

Расположение трещин генерировалось случайно, но затем трещины, пересекающие скважину и тоннель, передвигались так, чтобы совпадать с наблюдаемыми. Проницаемость трещин пересчитывалась так, чтобы соответствовать их расходам и гидравлической проводимости скважины.

В модели дискретной сети трещин (ДСТ) предполагается, что движение воды и миграция загрязнителя происходят только через сеть трещин без участия матрицы массива. При этом каждая трещина является двумерным линейным объектом со специфическими формой, размером, гидравлическими свойствами (проницаемость и апертура).

Для моделирования фильтрации и миграции также может быть использована эквивалентная непрерывная модель (ЭНМ) [7]. В ней индивидуальные свойства трещин транслируются в свойство эквивалентной пористости среды. Основная цель ЭНМ — воспроизвести поведение, то есть поток и миграцию, соответствующей сети трещин.

Американской и японской группами был осуществлен переход к модели ЭНМ посредством апскейлинга модели ДСТ для моделирования фильтрации и миграции. Сравнение

результатов моделирования миграции показывает, что в масштабах эксперимента модель ДСТ дает лучшее совпадение с миграционными тестами, но и модель ЭНМ, полученная на основе ДСТ, позволяет получить адекватные результаты.

### Заключение

Информация, полученная на совещании Кристаллического клуба, имеет самое непосредственное отношение к планированию исследований в ПИЛ, которая сооружается на месте предполагаемого ПГЗРО в Нижнеканском массиве (НКМ). Это связано с тем, что сооружение ПИЛ НКМ планируется также в кристаллических породах (архейских гнейсах).

В программу исследований включены геофизические исследования с поверхности. Проходка шахтных стволов будет сопровождаться геологическим изучением и документированием. При проходке будет осуществляться контроль НДС массива с целью оптимизации характеристик буровзрывных работ. Кроме того, уточнение планов последующих работ будет осуществляться с учетом полученной информации.

Важным элементом процедуры обоснования безопасности ПГЗРО является расчетное моделирование фильтрационных потоков и переноса радионуклидов в кристаллическом массиве с учетом его трещиноватой структуры. На совещании был представлен подход, который может быть адаптирован для моделирования фильтрации и миграции в системе трещин массива кристаллических пород НКМ.

Для реализации этого подхода требуется актуальная информация о трещинах (направлении, раскрытии, расходе воды и т. п.) и взаимосвязи системы трещин. Для получения такой информации в разрабатываемом наборе гидрогеологических экспериментов в ПИЛ планируются следующие исследования:

- гидрогеологический мониторинг, который обеспечит информацию о водопритоках, в том числе по трещинам;
- трассерные исследования (односкважинные и кустовые в пределах одного или различных разрывных нарушений), которые обеспечат информацию о фильтрационных характеристиках в трещиноватой среде, а также позволят сделать выводы об уровне связности системы трещин;
- эксперименты с закачкой эпоксидной смолы, которые позволят изучить характеристики отдельных трещин.

## Литература

1. URL: <http://www.oecd-nea.org/rwm/crystallineclub/>
2. Japan Nuclear Cycle Development Institute: «Master Plan of the Mizunami Underground Research Laboratory Project», JNC TN7410 2003-001, (2002).
3. Saegusa H., Osawa H., Onoe H., Ohyama T., Takeuchi R., & Takeuchi S. Stepwise hydrogeological characterisation utilising a geosynthesis methodology—A case study from the Mizunami Underground Research Laboratory Project // In Third AMIGO Workshop Proceedings, Approaches and challenges for the use of geological information in the safety case, Nancy, France, 2008, April, pp. 15—18.
4. Mikake S. I., Iwatsuki T., Matsui H., & Sasao E. Current Status and Next Five-year Plan of R&D Activities of Mizunami Underground Research Laboratory.
5. Kalinina E. A., Hadgu T., Wang Y., Ozaki Y., & Iwatsuki T. Development and validation of a fracture model for the granite rocks at Mizunami underground research laboratory Japan (no. Sand2018-2673c). Sandia National Lab. (SNL-NM), Albuquerque, NM (United states), 2018.
6. Ando K., Tanaka T., Hashimoto S., Saegusa H., & Ono H. Study for establishment of the methodology for hydrogeological modeling using hydraulic discrete fracture networks. Study on hydrogeology in crystalline fractured rock (No. JAEA-RESEARCH-2012-022). Japan Atomic Energy Agency, 2012.
7. Kalinina E. A., Klise K. A., McKenna S. A., Hadgu T., & Lowry T. S. Applications of fractured continuum model to enhanced geothermal system heat extraction problems // Springer plus, 2014, 3(1), 110.

---

## Информация об авторах

Савельева Елена Александровна, кандидат физико-математических наук, заведующая лабораторией, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: esav@ibrae.ac.ru.

## Библиографическое описание статьи

Савельева Е. А. Международная кооперация по геологическому захоронению РАО в кристаллических горных породах (Кристаллический клуб) // Радиоактивные отходы. 2019. № 2 (7). С. 58—64. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-58-64.

---

## INTERNATIONAL COOPERATION IN RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL IN CRYSTALLINE ROCKS (CRYSTALLINE CLUB)

Saveleva E. A.

Nuclear Safety Institute of RAS, Moscow, Russia

Article received 17 April 2019

*The paper presents some materials of the second meeting of the Crystalline Club (CRC/IGSC/NEA OECD). It considers the phases of construction and operation of the Underground Research Laboratory placed in a crystalline rock using Mizunami URL (Japan) as an example. It also considers an important problem dealing with transport modeling in the fractured rock. Real data from an experiment are used to build a stochastic discrete fracture network (DFN). Migration of radionuclides is modelled both within DFN and within equivalent pore medium following DFN.*

**Key words:** *crystalline rock, fracture network, modelling, underground research laboratory (URL), phases of URL life, investigations in URL.*

### References

1. <http://www.oecd-nea.org/rwm/crystallineclub/>
2. Japan Nuclear Cycle Development Institute: “Master Plan of the Mizunami Underground Research Laboratory Project”, JNC TN7410 2003-001, (2002).
3. Saegusa, H., Osawa, H., Onoe, H., Ohyama, T., Takeuchi, R., & Takeuchi, S. Stepwise hydrogeological characterisation utilising a geosynthesis methodology — A case study from the Mizunami Underground Research Laboratory Project. In *Third AMI-GO Workshop Proceedings, Approaches and challenges for the use of geological information in the safety case, Nancy, France, 2008, April*, pp. 15–18.
4. Mikake, S. I., Iwatsuki, T., Matsui, H., & Sasao, E. Current Status and Next Five-year Plan of R&D Activities of Mizunami Underground Research Laboratory.
5. Kalinina, E. A., Hadgu, T., Wang, Y., Ozaki, Y., & Iwatsuki, T. (2018). Development and validation of a fracture model for the granite rocks at Mizunami underground research laboratory Japan (no. Sand2018-2673c). Sandia National Lab. (SNL-NM), Albuquerque, NM (United states).
6. Ando, K., Tanaka, T., Hashimoto, S., Saegusa, H., & Onoe, H. (2012). Study for establishment of the methodology for hydrogeological modeling using hydraulic discrete fracture networks. Study on hydrogeology in crystalline fractured rock (No. JAEA-RESEARCH-2012-022). Japan Atomic Energy Agency.
7. Kalinina, E. A., Klise, K. A., McKenna, S. A., Hadgu, T., & Lowry, T. S. (2014). Applications of fractured continuum model to enhanced geothermal system heat extraction problems. *Springer plus*, 3 (1), 110.

---

### Information about authors

Saveleva Elena Aleksandrovna, PhD, Head of laboratory, Nuclear Safety Institute of RAS (52, Bolshaya Tulkaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: esav@ibrae.ac.ru.

### Bibliographic description

Saveleva E. A. International Cooperation in Radioactive Waste Disposal in Crystalline Rocks (Crystalline Club). *Radioactive Waste*, 2019, no. 2 (7), pp. 58–64. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-58-64. (In Russian).