

# ПОДЗЕМНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ И ПРИРОДНЫЙ АНАЛОГ ХРАНИЛИЩА ОЯТ В ГРАНИТАХ: ПРИМЕР МЕСТОРОЖДЕНИЯ АНТЕЙ

Н.П. ЛАВЕРОВ<sup>1</sup>, В.А. ПЕТРОВ<sup>1</sup>, С.И. ЩУКИН<sup>2</sup>, Й. ХАММЕР<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН, 119017, Москва, Ж-17, Старомонетный пер., 35*

<sup>2</sup>*ОАО «Приаргунское производственно горно-химическое объединение», 674673, Забайкальский край, Краснокаменск*

<sup>3</sup>*Федеральное ведомство по геонаукам и природным ресурсам (БГР), 30655, Стиллевег 2, Ганновер, Германия*

Опыт функционирования подземных исследовательских лабораторий (ПИЛ) в гранитных массивах Швеции (Аспё), Канады (Уайт Шел), Швейцарии (Гримзель), Финляндии (ОНКАЛО) и Японии (Мицунами) будет использован при создании ПИЛ в России, по-видимому, в районе Нижнеканского гранитоидного массива, Красноярский край. Этот опыт (трассерные, нагревательные др. тесты) свидетельствует, что для определения механизмов миграции и накопления радионуклидов (актинидов) в трещинно-поровых неоднородно деформированных породах необходимы данные по урановым месторождениям. Они являются природными аналогами процессов, которые, как ожидается, будут протекать на объектах долговременного хранения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ, на 95% состоящего из  $UO_2$ , т.е. настурана-уранинита), размещенных в глубинных геологических структурах. В гранитных массивах такие месторождения: Эль Беррокал (Испания), Палмотту (Финляндия), Санерли (Китай) и Камаиши (Япония). Однако различия в геотектонических, гидрогеологических, окислительно-восстановительных и др. обстановках для ПИЛ и месторождений создает ряд неопределенностей и противоречий в долгосрочной оценке событий и уровня безопасности хранилищ. Разрешить их возможно, если ПИЛ оборудована на базе уранового месторождения, рудные тела которого залегают на глубинах, соответствующих положению рабочего горизонта объекта длительного хранения ОЯТ. В настоящее время единственный пример такого пространственного совмещения – жильно-штокверковое урановое месторождение Антей в Юго-Восточном Забайкалье. Оно локализовано в палеозойских гранитах, а рудные тела, сложенные настураном ( $UO_{2+x}$ ), вскрыты на глубинах от 400 до 1000 м разветвленной системой горных выработок. Поэтому в рамках Программы № 16 Президиума РАН месторождение Антей изучается с целью детальной разработки вопросов долговременного хранения ОЯТ в глубинных структурах гранитных массивов. Представлены первые результаты исследований, намечаются направления дальнейших работ и пути приложения полученных данных для научного обеспечения проекта создания ПИЛ в России.

## ВВЕДЕНИЕ

Принципиальное значение для оценки уровня безопасности объектов длительного хранения ОЯТ, размещенных в глубинных геологических структурах, имеют параметры напряженно-деформированного состояния массива пород, рассеченного многочисленными гидравлически активными разрывами. Эта информация необходима

для инженерно-геологических расчетов и планирования горнопроходческих работ, а также для определения граничных условий фильтрационно-транспортных, геомеханических, теплофизических и других прогнозных моделей.

Долговременная устойчивость каркаса разрывных нарушений массивов кристаллических пород к нагрузкам различной природы изучается в ПИЛ (Лаверов и др., 2008<sub>1</sub>). Функционирующие в настоящее время ПИЛ разделены на две группы: 1) сооруженные для проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) на площадках, которые никогда не будут использоваться для размещения ядерных материалов и 2) сооруженные для проведения НИОКР на площадках, где такое размещение планируется (The role..., 2001). В гранитных массивах первая группа (generic URLs) включает ПИЛ: Аспё в Швеции (Äspö..., 1996), Уайт Шел в Канаде (Everitt *et al.*, 1998), Гримзель в Швейцарии (Müller, 1988) и Мицунами в Японии (Saito *et al.*, 1999). Исследовательский туннель ОНКАЛО в Финляндии (Vieno *et al.*, 2003) относится к ПИЛ второй группы (on-site URLs). Основной набор геолого-геофизических, инженерно-геологических, геомеханических, гидрогеологических и других изысканий, проводимых в ПИЛ обеих групп, не отличается, но варьирует в зависимости от целей и задач исследований, а также их продолжительности и объема вложенных средств.

Анализ опубликованных данных показывает, что одно из важнейших направлений исследований в ПИЛ – установление вариаций напряженно-деформированного состояния среды на различных гипсометрических уровнях разреза пород в связи с изменением морфоструктурных свойств разрывных нарушений и устойчивости подземных горных выработок. Изменение морфоструктуры и кинематики каркаса разломов при воздействии природных и/или техногенных нагрузок сопровождается разрушением и образованием минеральных агрегатов в полостях трещин, трансформацией поровых каналов в околотрещинном пространстве, гипергенными изменениями вмещающих пород из-за подтока кислородсодержащих вод и другими сопутствующими физико-химическими преобразованиями (Rock fractures..., 1996). Их взаимодействие неизбежно приводит к изменению фильтрационных и сорбционно-емкостных свойств разрывных нарушений и массива пород в целом. Одновременно с этим изменение сорбционно-емкостных свойств минеральных агрегатов в трещинах и околотрещинном пространстве влечет за собой изменение условий транспорта радионуклидов и замену одних транспортных механизмов другими (Петров и др., 2008<sub>1</sub>). В итоге разломы и сопровождающие их зоны динамического влияния могут неоднократно выступать в качестве проводников или барьеров на пути

миграции флюидов и транспорта радионуклидов, а также выполнять комбинированную функцию проводящих каналов – задерживающих барьеров.

В наиболее яркой форме пространственно-временные изменения фильтрационно-транспортных свойств разрывных структур проявлены на гидротермальных урановых месторождениях. Здесь гипогенная урановая минерализация, локализованная в ограниченном объеме трещинно-порового пространства, при определенных термобарических и физико-химических условиях может находиться без существенных преобразований сотни миллионов лет. В связи с тем, что ОЯТ на 95% состоит из  $UO_2$ , т.е. настурана (уранинита), то предполагается, что размещение хранилищ на глубинах ниже 500 м от дневной поверхности является надежной гарантией их безопасности. Это заключение основано на установленном факте, что поведение урана при взаимодействии подземных вод с горными породами и урановыми рудами изменяется с глубиной (Омельяненко и др., 2007). В окислительных условиях верхних горизонтов взаимодействие кислородсодержащих вод с урановыми рудами неизбежно ведет к их разрушению и переводу урана из горных пород и руд в подвижную  $U(VI)$  форму. На глубоких горизонтах в условиях затрудненного водообмена, где подземные воды имеют восстановительные близонейтральные свойства, процессы взаимодействия протекают очень медленно и выражаются в образовании вторичных минералов и диффузионном перераспределении урана с развитием сорбированной формы. Возможность выявления сути процессов разрушения урановых руд, миграции и накопления урана (актинилов) в различных окислительно-восстановительных обстановках и приложения этих данных для оценки последствий размещения ядерного топлива в глубинных геологических структурах определяет урановые месторождения как природные аналоги объектов длительного хранения ОЯТ (Smellie, Karlsson, 1999). В гранитных массивах такие аналоги: месторождения Эль Беррокал в Испании (Pérez del Villar *et al.*, 2003), Палмотту в Финляндии (Blomqvist *et al.*, 2000), Санерли в Китае (Min *et al.*, 1998) и, с некоторыми оговорками, Камаиши в Японии (Yoshida *et al.*, 2000). Следует отметить, что исследования процессов миграции урана на этих месторождениях, за исключением Камаиши, которое урановым не является, были сосредоточены в зоне аэрации (окисления) вмещающих гранитных массивов. Возможности для изучения и сравнительного анализа особенностей миграции и накопления урана (актинилов) в окислительных и восстановительных условиях в различной степени водонасыщенных породах на этих объектах ограничены, так как их глубокие горизонты вскрыты отдельными скважинами, а не разветвленной системой подземных горных выработок.

В связи с этим основная цель доклада – в контексте материалов по урановым месторождениям и ПИЛ в гранитных массивах охарактеризовать жильно-штокверковое урановое месторождение Антей в Юго-Восточном Забайкалье как уникальный объект (Лаверов и др., 2008<sub>2</sub>), в котором совмещены черты аналога процессов миграции актинидов на объекте длительного хранения ОЯТ в глубинных геологических структурах и подземной геодинамической лаборатории.

## **МЕСТОРОЖДЕНИЕ АНТЕЙ - ПРИРОДНЫЙ АНАЛОГ ХРАНИЛИЩА ОЯТ**

Жильно-штокверковое месторождение Антей расположено в Юго-Восточном Забайкалье в пределах Стрельцовой кальдеры, сформированной в процессе позднемезозойской тектоно-магматической активизации региона. Месторождение локализовано в гранитном фундаменте кальдеры. Информация о геологическом строении, петрографии и петрохимии пород, минерально-химическом составе руд и метасоматитов месторождения в наиболее полном виде обобщена в (Ищукова, 2007). Поэтому ниже приведены только те данные, которые, отражая специфические черты строения месторождения, необходимы для дальнейшего его рассмотрения в качестве природного аналога объекта долговременного хранения ОЯТ в гранитном массиве.

Позднепалеозойские (~ 250 млн. лет) гранитоиды фундамента кальдеры вскрыты в районе месторождения до глубины более 2.5 км. В верхних частях разреза породы представлены в основном среднезернистыми биотитовыми гранитами, а в нижней части разреза породы становятся более меланократовыми, проявляется их гнейсовидность и увеличивается объем гибридных разновидностей (плагиограниты, гранодиориты и диориты, перемежающиеся с биотитовыми и лейкократовыми гранитами, гранитизированными амфиболитами и гнейсами).

Ранние преобразования пород представлены высокотемпературными метасоматитами: калишпатитами и альбититами. Они сформировались в палеозойский этап гидротермальной активности и относятся к типу метамагматических, т.е. образовавшихся в самом конце процесса кристаллизации гранитоидной магмы. Зоны калишпатизации формируют прототектонические структуры, которые вытянуты в субширотном направлении в виде жиллообразных тел мощностью до первых десятков м.

Основная роль в локализации уранового оруденения принадлежит разломам ССВ-ЮЮВ (30°) простирания, которые секут субширотные элементы прототектоники. Важнейшие из них – разломы 13, 161, 160 и 160г. Последние три оперяют разлом 13 со стороны висячего бока и вместе с ним образуют «рудоносную зону» мощностью 20-60

метров. Верхняя часть зоны располагается на глубине ~400 м, а низы ее подсечены разведочными скважинами на глубине ~1300 м от дневной поверхности. Рудоносная зона объединяет крутопадающие жилообразные рудные тела с брекчиевыми, прожилково- и гнездово-вкрапленными рудами. В верхней части зоны развиты настурановые руды, а в нижних частях зоны наряду с настураном проявлен браннерит и увеличивается содержание коффинитоподобного настурана. Урановое оруденение формируется в ореолах мезозойских гидротермально-метасоматических изменений пород (Андреева, Головин, 1998): дорудных (гидрослюдистых), рудосопровождающих (хлорит-гематит-альбитовых) и пострудных (каолинит-смектитовых и др.), которые контролируются разломами ССВ-ЮЮЗ простирания.

Дорудные гидрослюдизиты образуют ореолы шириной от первых до 50 м. Основной мотив преобразований состоит в интенсивном развитии дисперсных светлых слюд (гидрослюд), которые по существу представляют собой смешанослойное иллит-смектитовое образование с высоким (не менее 15 %) содержанием неразбухающих слоев слюдяного типа. Гидрослюды в первую очередь замещают плагиоклаз и биотит, а калиевые полевые шпаты замещены слабее. Широко развиты метасоматические карбонаты: во внешних частях зон преобразований преобладают кальциты, а во внутренних – Fe-карбонаты (анкерит, сидерит, магниезиальный сидерит). По отношению к вертикальной и латеральной зональности гидрослюдизитов урановые рудные тела могут занимать произвольное положение, но никогда не выходят за пределы этих ореолов в неизменные породы.

Внутри рудных тел и в непосредственной близости от них проявлены рудосопровождающие гематит-альбитовые и более поздние бертьерин-хлоритовые прожилково-метасоматические изменения, а также окварцевание и карбонатизация. Гематит-альбитовые метасоматиты локализованы как в центральных частях зон гидрослюдизации, так и на их периферии, но не выходят в неизменные породы. Мощность метасоматитов вдоль рудоконтролирующих разломов может достигать 15 м.

Пострудные (постурановые) аргиллизиты проявились в виде узких зон, приуроченных к разрывным нарушениям, контролирующим урановое оруденение. В их состав входит смектит и каолинит или только смектит, замещающие полевошпатовую часть породы. Эти процессы часто сопровождаются растворением околорудного гематита и резким осветлением гематит-альбитовых пород с урановым оруденением. Жильные выделения минералов группы каолинита–диккита образуют тонкие примазки и корочки на стенках трещин, реже – прожилковидные обособления мощностью и протяженностью до нескольких см.

Состав гидротермальных растворов для месторождения Антей реконструирован по газо-жидким включениям в основных жильных, рудных и метасоматических минералах (Наумов и др., 1985), а также с помощью термодинамического анализа минеральных парагенезисов (Мироненко, 1985). Установлено, что гидротермальный процесс, с которым связано образование урановых руд, протекал в интервале температур 180-140°C в практически изотермических условиях. Растворы характеризовались высокой углекислотностью (от  $n \times 10^2$  до  $n \times 10$  г/кг  $H_2O$ ). При этом концентрация  $CO_2$  падала в пространстве от нижних горизонтов к верхним и во времени – от более ранних минеральных ассоциаций к поздним. Поступающий в зону минералообразования высокоуглекислый гидротермальный раствор вызывал гидрослюдизацию и карбонатизацию плагиоклаза, гидрослюдизацию части калишпата, возрастание количества кварца в породе, резкий вынос натрия из породы в раствор. Далее по мере удаления углекислоты (дегазации) гидрослюда замещалась альбитом, уменьшалось количество кварца и откладывался настуран ( $UO_{2.25}$ ).

Таким образом, следующие элементы геологического строения месторождения Антей, позволяющие рассматривать его как природный аналог, соответствуют инфраструктурным элементам объекта длительного хранения ОЯТ:

- рудные тела сложены настураном (аналог ОЯТ);
- рудные тела окружены «пакетом» гидротермально-измененных пород (гидрослюдизиты и низкотемпературные минеральные ассоциации – аналог буфера-забивки);
- пакеты гидрослюдизитов залегают в толще неизмененных вмещающих гранитов (дальнее поле хранилища);
- во вмещающих породах проявлены гидравлически активные разрывы, что также следует ожидать в районе хранилища.

Базовый сценарий состоит в том, что изолированное в течение длительного времени ОЯТ (первичные настурановые руды) практически одномоментно (в масштабе геологического времени) разрушается в зонах разломов и экспонируется для окислительных процессов со стороны инфильтрующихся кислородсодержащих вод и атмосферных газов в горных выработках. Такой сценарий подразумевает реализацию механизма «мгновенной» деформации структур массива, например, в связи с сейсмодислокациями. Также может рассматриваться сценарий разрушения хранилища при более низких (криповых) скоростях деформирования массива.

Каркас разрывных нарушений, петрофизические свойства и напряженно-деформированное состояние пород изучены на трех нижних горизонтах месторождения в контексте его анализа как подземной геодинамической лаборатории.

## ПОДЗЕМНАЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ

Благодаря своей хорошей вскрытости месторождение Антей предоставляет широкие возможности для изучения сложных горно-геологических условий и их влияния на устойчивость среды, в которой размещается ОЯТ, к природным и техногенным нагрузкам.

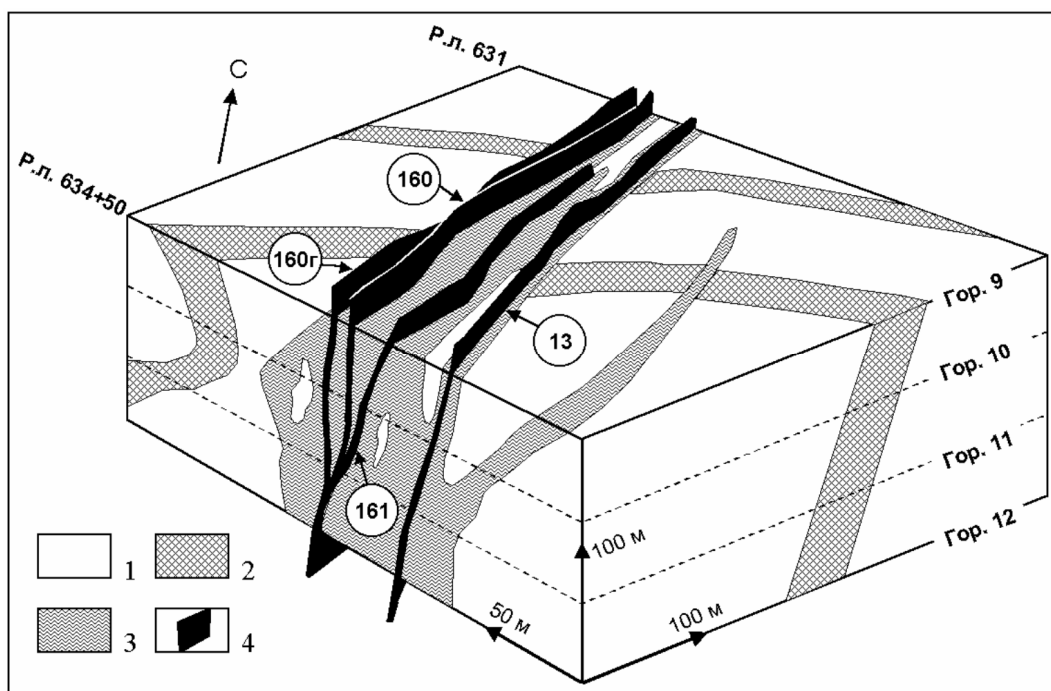
Размеры изучаемого блока составляют в плане 350 м (длина) x 150 м (ширина), а в разрезе от горизонта 9 (абс. отм. +182 м) до горизонта 12 (абс. отм. 0 м), расположенного на глубине ~700 м от дневной поверхности.

Результаты структурно-геологического, петрографо-минералогического и структурно-петрофизического картирования легли в основу трехмерной геологической модели нижней части месторождения. Она объединяет инфраструктуру подземных горных выработок, плоскости разломов 160, 160г, 161 и 13, а также блоки разновозрастных метасоматитов, которые отличаются по составу, свойствам и структурному контролю (Фиг.).

При формировании модели использовались оцифрованные погоризонтные планы и разрезы масштаба 1:500, предоставленные геолого-маркшейдерской службой ОАО «ППГХО». Применялся пакет программ «openGEO», в котором обработка всего набора данных проводилась с помощью метода триангуляции (Hammer *et al.*, 2003). Модель построена на реальной системе координат и расстояния в ней – истинные. Это позволяет: а) определять точное положение и объемы геологических тел и структур в любом сечении; б) осуществлять привязку эпицентров проявления горного давления (удары, вывалы, шелушение пород); в) корректировать и дополнять созданное «ядро» модели любой вновь поступающей информацией (геологической, геофизической, маркшейдерской, минералогической, петрофизической, геомеханической и т.д.).

В изученном блоке ведущие элементы каркаса разрывных нарушений – сближенные в пространстве субпараллельные зоны разломов 160 и 13, а второстепенные – разломы 161 и 160г, оперяющие разлом 160. Эти три разлома в свою очередь оперяют разлом 13 со стороны его висячего бока. Зона разлома 160 – основная рудовмещающая структура месторождения. Она состоит из 1-3 копланарных швов ССВ-ЮЮЗ (25-30°) простирания и крутого (75-85°) ЮВ падения, формирующих

эшелонированный левосторонний сдвиг. Суммарная амплитуда горизонтальных смещений, исходя из «расхождения» разрывов отрывного характера с одновозрастной минерализацией, достигает 40 м. Швы выполнены пакетами глинки трения мощностью до 1 м и сопровождаются зонами повышенной нарушенности пород мощностью от первых до десятков метров. Разлом 160 экранируется по восстанию пологими срывами на границе фундамента и вулканогенного чехла кальдеры.



Фиг. Упрощенная трехмерная модель разломов и блоков разновозрастных метасоматитов нижней части месторождения Антей, созданная с помощью пакета программ «орепGEO». 1 – вмещающие граниты; 2 – калишпатиты и альбититы; 3 – гидрослюдзиты; 4 – плоскости разломов (указаны номера). Жилообразные тела палеозойских калишпатитов и альбититов, связанные с элементами прототектоники, секутся разломами 13, 160, 161 и 160г, которые контролируют ореолы мезозойских гидрослюдзитов и не показанные рудные тела, рудосопровождающие и пострудные изменения.

Зона разлома 13 также образована несколькими кулисообразно расположенными швами ССВ-ЮЮЗ простирания и крутого (75-80°) падения на СЗ. Разлом смещает контакт структурных этажей фундамента и чехла кальдеры с суммарной амплитудой до 15 м, пересекает чехол и трассируется на поверхности. Глубже горизонта 11 зоны разломов 160 и 13, имеющие в плане общее простирание, но в разрезе встречное падение, практически сливаются в единую структуру. В связи с этим формируется «тектонический клин», внутреннее пространство которого наиболее дезинтегрировано по сравнению с окружающими породами.

Различия в составе и интенсивности проявления разновозрастных метасоматитов на западном фланге, в межразломном пространстве и на восточном фланге месторождения отражаются в петрофизических и механических параметрах пород. Так, наибольшими значениями предела прочности на одноосное сжатие и предела упругости обладают окварцованные, а наименьшими – интенсивно преобразованные (гидрофлюидизированные и аргиллизированные) разности пород. Минимальные значения упругих параметров (скорости  $P$ - и  $S$ -волн, модуль Юнга, сдвига и объемного сжатия, коэффициент Пуассона) характерны для ядер разломов, где породы подвержены интенсивным гидрофлюидистым изменениям и аргиллизации, а максимальные – для интенсивно окварцованных ядер разломов. Наиболее ярко эти отличия проявлены в основном сместителе разлома 13, где на уровне горизонта 9 развиты гидрофлюидистые изменения, а на уровне горизонта 11 – интенсивное окварцевание. Основные вариации упругих параметров наблюдаются в зонах динамического влияния разломов, но повышение или понижение значений зависит от пространственного соотношения типов метасоматитов. Например, значения упругих параметров повышаются в случае перехода от аргиллизированных и гидрофлюидизированных (упруго-пластичная среда) к более окварцованным (упруго-хрупкая среда) разностям пород и, наоборот, понижаются по мере удаления от окварцованного ядра разлома к упруго-пластичным гидрофлюидизированным и аргиллизированным породам зоны динамического влияния. Наряду с этим установлено, что общая картина анизотропии упругих свойств массива пород определяется тремя субширотными зонами: северной, центральной и южной. Для северной и южной зон характерны СВ-ЮЗ, а для центральной СЗ-ЮВ направления увеличения  $V_P$  и  $V_S$  при водонасыщении пород. Природа такой анизотропии связана с элементами прототектоники, задающими субширотную ориентировку тел домезозойских калишпат-альбитовых метасоматитов, неоднородностью распределения напряжений и деформаций в породах при сдвиговых смещениях вдоль копланарных плоскостей разломов в мезозойский этап тектогенеза, а также особенностями современного напряженно-деформированного состояния массива (Петров и др., 2008<sub>2</sub>).

Реконструкция динамики изменения тектонического поля напряжений в горном массиве показала, что каркас разрывных нарушений месторождения формировался в течение четырех основных этапов тектогенеза, три из которых протекали в геологическом прошлом, а четвертый – современный. На протяжении этих этапов происходили: переориентировка осей главных нормальных и скалывающих напряжений, изменение характера напряженно-деформированного состояния пород,

смена направлений смещений в разрывных нарушениях и обстановки минералообразования.

*Первый этап* тектогенеза восстанавливается по линейности высокотемпературных калишпатитов и альбититов, что указывает на субширотную ориентировку оси максимального сжатия ( $\sigma_1$ ).

*Второй этап* тектогенеза объединяет по времени процессы предрудной гидрослюдизации, рудосопровождающих альбит-гематитовых изменений, включая формирование криптокристаллического кварца, и рудообразования. Исходя из морфологии рудных тел, на этом этапе при СЗ–ЮВ ориентировке оси  $\sigma_1$  по зоне разлома 160 происходили левосторонние сдвиговые перемещения с последовательным приоткрыванием и заполнением рудным веществом полостей разрывов, расположенных в плоскости  $\sigma_1\sigma_2$ . Тектонические напряжения этого этапа были сосредоточены в пределах зоны разлома 160, в «деформационной тени» которого находилась зона разлома 13.

*Третий этап* тектогенеза связан с глобальной перестройкой тектонического поля напряжений, когда ориентировка оси  $\sigma_1$  изменилась на  $90^\circ$  и траектории сжимающих усилий протянулись в СВ–ЮЗ направлении. Этот этап ассоциируется с концентрацией основных напряжений в зоне разлома 13, выходом его из «деформационной тени» разлома 160 и максимальным развитием выдержанных жил, выполненных минералами пострудной стадии (каолинит, смектит) к концу гидротермального процесса. Учитывая факт смещения разломом 13 контакта структурных этажей фундамента и вулканогенного чехла, а также ориентировку оперяющих разрывов, выполненных пострудной минерализацией, тип перемещений вдоль зоны разлома интерпретируется как правосторонний сдвиг или сдвига-сброс.

*Четвертый (современный) этап* тектогенеза унаследует основные черты предыдущего этапа, когда траектории максимальных сжимающих усилий ( $\sigma_1$ ) протягиваются в СВ–ЮЗ направлении. В региональном плане это отражается в сдвиговом характере современного поля напряжений (Reinecker *et al.*, 2005). В масштабе месторождения СВ–ЮЗ направление сжатия реконструируется по деформациям контуров вертикальных горных выработок и ориентировке штрихов скольжения в свежем глинистом выполнении ядра разлома 13.

Изучение деформаций стенок скважин, шахт, восстающих и рудоспусков – один из наиболее простых и точных методов определения ориентировки осей действующих в горном массиве напряжений (Hudson *et al.*, 2003). С течением времени из-за перераспределения (концентрации и релаксации) напряжений исходные контуры

выработок изменяются и их стенки разрушаются. Ключевой момент анализа структуры поля напряжений состоит в том, что разрушение стенок происходит в секторах, расположенных ортогонально к оси максимального горизонтального стресса ( $S_H$ ). Наши наблюдения показали, что на уровне горизонта 9 ось  $S_H$  ориентирована под углом  $50^\circ$ , а на уровне горизонта 12 – под углом  $80^\circ$  к линии меридиана. Следовательно, на вертикальном интервале  $\sim 180$  м в разрезе массива происходит переориентировка оси действующего сжатия на  $30^\circ$ . Поэтому, если на горизонте 9 разрушаются, в основном, северо-западные и юго-восточные сектора выработок, то на уровне горизонта 12 деформации концентрируются в северных и южных секторах и стенках горных выработок.

Изучение элементов залегания штрихов скольжения в свежем невыветрелом глинистом выполнении ядра разлома 13 на горизонте 9 показывает, что близкие по времени к современным перемещения вдоль основного проводника разлома могут быть интерпретированы и как левосторонний сбросо-сдвиг, и как правосторонний взбросо-сдвиг. Первый вариант менее вероятен, учитывая СЗ-ЮВ ориентировку оси  $S_H$ , но не исключается в связи с возможностью разнонаправленных и разноамплитудных перемещений в копланарных сегментах разлома. Обычно предполагается, что уровень тангенциальных напряжений и, следовательно, вероятность развития сдвиговых дислокаций в разрывно-трещинных системах с глубиной в целом уменьшается. Однако эти теоретические закономерности нередко не согласуются с реальной геологической ситуацией, когда с глубиной предрасположенность разрывов к сдвигу возрастает. Такие условия возникают главным образом из-за переориентировки (виргации) плоскостей сместителей и изменения угла их встречи с осью  $S_H = \sigma_1$  (при сдвиговом тектоническом режиме). Для определения характера перемещений сопряженных крыльев разломов необходим статистически значимый набор данных. Но даже его наличие не позволяет ответить на важнейшие для понимания динамики геомеханического поведения горного массива вопросы: а) абсолютные значения (магнитуда) напряжений; б) скорость перемещений по разломам и их амплитуда; в) частота и продолжительность дислокационных событий; г) приуроченность узлов концентрации и рассредоточения напряжений к конкретным структурным элементам и т.д. К тому же в разрезе массива изменяется не только ориентировка оси максимального горизонтального стресса. В связи с нарастанием литостатической нагрузки и неоднородностью петрофизических свойств пород с глубиной будет неизбежно изменяться магнитуда напряжений и общая геодинамическая ситуация, как это происходит в ПИЛ Аспё (Talbot, Sirat, 2001; Ask, 2003), Гримзель (Pahl *et al.*, 1989) и Уайт Шел (Read *et al.*, 1998). Поэтому на различных

гипсометрических уровнях месторождения Антей необходимо провести мониторинг геомеханических процессов инструментальными методами с увязкой получаемых параметров в трехмерной геологической модели.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В настоящее время в экономически развитых странах проводятся широкомасштабные исследования по решению задачи длительного контролируемого хранения огромного количества накопленного ОЯТ в глубинных структурах массивов кристаллических пород. Важнейшее направление этих работ – определение долговременной устойчивости вмещающей среды и подземной инфраструктуры объектов долговременного хранения ОЯТ к природным и техногенным нагрузкам. Для этого созданы и длительное время функционируют ПИЛ двух групп: сооруженные на площадках, где ОЯТ никогда не будет размещаться (generic URLs) и сооруженные на площадках, где такое размещение планируется, а подземные выработки лаборатории в случае принятия решения о строительстве объекта будут использованы как часть его инфраструктуры (on-site URLs). Эти объекты, особенно второй группы, должны находиться на удалении от скоплений минерального сырья (Site selection..., 1977) и тем более от урановорудных месторождений – сырьевой базы ядерного топливного цикла. Поэтому в подземных лабораториях для выяснения способности среды ограничивать скорость миграции радионуклидов в фильтрующемся потоке подземных вод используются трассерные тесты. Их результаты составляют основу для долгосрочной оценки развития природных процессов и техногенных воздействий, а также уровня безопасности объекта долговременного хранения ОЯТ. Однако приложимость этих результатов к прогнозным фильтрационно-транспортным моделям имеет целый ряд ограничений (Frick, Alexander, 1992; McKinley, Alexander, 1992). Вследствие этого для установления динамики процессов миграции радионуклидов и обоснования барьерных свойств трещиноватых неоднородно деформированных пород широко используются данные по урановым месторождениям – природным аналогам объектов длительного хранения ОЯТ, состоящего на 95% из  $UO_{2+x}$ . В гранитных массивах такие аналоги: месторождения Эль Беррокал (Испания), Палмотту (Финляндия), Санерли (Китай) и, с некоторыми оговорками, Камаиши (Япония). При этом приходится учитывать, что в каждом конкретном месте геологическая среда характеризуется своими индивидуальными особенностями, определяющими специфику процессов миграции и накопления урана и других радионуклидов в сложившихся окислительно-

восстановительных условиях. Для объектов, расположенных в других условиях, полученная информация имеет ценность в контексте общих и предварительных оценок. Данное утверждение справедливо и для подземных лабораторий. Они расположены в геотектонических обстановках стабильных кратонов (Аспё в Швеции, Уайт Шел в Канаде и ОНКАЛО в Финляндии), поясов альпийского орогенеза (Гримзель в Швейцарии) и сейсмически активных океанических дуг (Мицунами в Японии), где характер и интенсивность протекания фильтрационно-транспортных процессов существенно различаются.

В данном контексте район Нижнеканского гранитоидного массива также является примером неоднородности: при сравнении участков «Верхне-Итатский» (центральная часть массива) и «Енисейский» (гранито-гнейсовое обрамление массива) обнаруживаются их следующие основные различия: а) по структурно-тектонической позиции (Anderson *et al.*, 1998; Белов и др., 2007); б) по степени проявленности неотектонических и современных активных разрывных нарушений (Лукина, 1998); в) по минерально-петрографическому составу и структурно-петрофизическим свойствам пород (Лаверов и др., 2002; Petrov *et al.*, 2005); г) по напряженно-деформированному состоянию пород (Петров, 2001); д) по гидрогеохимии подземных вод (Гупало и др., 2004). Все эти параметры влияют на фильтрационно-транспортные характеристики среды и, в конечном счете, на долгосрочную оценку уровня безопасности подземного сооружения. Вне зависимости от того, на каком из участков будет принято решение о создании ПИЛ (on-site URL) для обоснования долговременной безопасности этого объекта необходимо будет ответить на ряд вопросов. Один из основных – это взаимосвязь между механизмами миграции радионуклидов в различных окислительно-восстановительных условиях и напряженно-деформированным состоянием среды на различных гипсометрических уровнях массива пород.

Представляется, что наиболее рационально отработать методику изучения этих важнейших аспектов долговременного хранения ОЯТ на таком объекте, где подземная лаборатория (generic URL) оборудована на базе уранового месторождения, рудные тела которого залегают на глубинах, соответствующих положению рабочего горизонта хранилища ОЯТ. В настоящее время единственный пример такого пространственного совмещения – жильно-штокверковое урановое месторождение Антей в Юго-Восточном Забайкалье. Оно локализовано в палеозойских гранитах на глубинах от 400 до 1000 м и вскрыто разветвленной системой горных выработок. Эти соображения явились основанием для постановки работ в рамках Программы № 16 Президиума РАН по детальному изучению месторождения Антей как объекта, воспроизводящего те

процессы и явления, которые будут происходить на объекте долговременного хранения ОЯТ, размещенном на глубоких горизонтах гранитного массива (Лаверов и др., 2008<sub>2</sub>). В обобщенном виде первые результаты геолого-структурных, петрографо-минералогических, тектонофизических и структурно-петрофизических исследований сводятся к следующему:

1. На различных уровнях геологического разреза прослеживается отчетливая зависимость петрофизических свойств пород от характера и интенсивности их метасоматической проработки. Установлена динамика формирования каркаса разрывных нарушений и неоднородность современного напряженно-деформированного состояния массива, которая обуславливает специфику деформаций пород в приконтурной зоне выработок. Создана трехмерная геологическая модель инфраструктуры подземных горных выработок, каркаса разрывных нарушений и блоков разновозрастных метасоматитов, различающихся минерально-химическим составом и упруго-прочностными свойствами. Она формирует основу для разработки концептуальной модели геодинамики массива, а также выделения в его пределах участков для проведения мониторинговых наблюдений за изменением напряженно-деформированного состояния пород и кинематикой разрывов инструментальными методами.

2. Следующие основные элементы геологического строения месторождения позволяют рассматривать его как природный аналог объекта длительного хранения ОЯТ в глубоких геологических структурах: а) рудные тела сложены настураном (аналог ядерного топлива); б) они окружены «пакетами» гидротермально-измененных пород (сочетание гидрослюдизитов и низкотемпературных минеральных ассоциаций создает аналог инженерного буфера для ядерного топлива); в) «пакеты» метасоматитов окружены толщей неизмененных вмещающих гранитов (инженерно-нарушенная зона горных выработок и породы дальнего поля хранилища); г) во вмещающих породах проявлены гидравлически активные разрывы, что также следует ожидать в районе хранилища. Большой вертикальный размах рудных тел и их принадлежность к блокам пород с различными петрофизическими свойствами и напряженно-деформированным состоянием позволяют детально изучить влияние этих факторов на устойчивость каркаса разрывных нарушений и горных выработок. Могут рассматриваться самые разнообразные сценарии сохранности ОЯТ (первичных настурановых руд). Один из сценариев состоит в том, что рабочий горизонт хранилища пересекается разломом и ОЯТ экспонируется для окислительных процессов со стороны инфильтрующихся кислородсодержащих вод и поступающих атмосферных газов. Такой сценарий

подразумевает реализацию механизма «мгновенной» деформации массива, например, в связи с сейсмодислокациями, но могут быть рассмотрены и сценарии разрушения хранилища при более низких скоростях деформирования пород.

3. Особенности геологического строения месторождения и напряженно-деформированного состояния вмещающих пород обеспечивают информацией весь комплекс изысканий, проводимых в настоящее время в ПИЛ в контексте оценки безопасности объектов длительного хранения ОЯТ в глубинных структурах гранитных массивов. Основные из них – выявление динамики изменения морфологии и фильтрационно-транспортных свойств разрывных нарушений в связи с вариациями напряженно-деформированного состояния среды на различных гипсометрических уровнях, а также оценка стабильности инженерных барьеров и горных выработок в неоднородном поле напряжений. Однако в отличие от подземных лабораторий, инфраструктура горных выработок месторождения и наличие урановорудных концентраций, сосредоточенных в зонах разломов, позволяет решать более широкий спектр задач. Одна из них – раскрытие взаимосвязи между геомеханическими процессами, развивающимися на различных гипсометрических уровнях горного массива, и миграцией радионуклидов в соответствующих этим уровням гидрогеологических условиях и окислительно-восстановительных обстановках. Реализация этих мероприятий на месторождении Антей позволит существенно продвинуться в решении проблемы обеспечения безопасности объектов длительного хранения ОЯТ в глубинных геологических структурах массивов кристаллических пород, а также использовать полученные данные и прошедшие апробацию методики исследований при формировании проекта создания ПИЛ в России, в том числе в районе Нижнеканского гранитоидного массива.

#### Литература

- Андреева О.В., Головин В.А. Метасоматические процессы на урановых месторождениях Тулукуевской кальдеры в Восточном Забайкалье (Россия) // Геология рудных месторождений. 1998. Т. 40. № 3. С. 205–220.
- Белов С.В., Морозов В.Н., Татаринов В.Н., Камнев Е.Н., Хаммер Й. Изучение строения и геодинамической эволюции Нижнеканского массива в связи с захоронением высокоактивных радиоактивных отходов // Геоэкология. 2007. № 3. С. 248-266.
- Гупало Т.А., Соколовский Л.Г., Поляков В.А. и др. Гидрогеология Нижнеканского гранитоидного массива // Разведка и охрана недр. 2004. № 5. С. 26-30.
- Ищукова Л.П. Урановые месторождения Стрельцовского рудного поля в Забайкалье. Иркутск: Типография «Глазовская», 2007.
- Лаверов Н.П., Петров В.А., Величкин В.И., Полуэктов В.В., Жариков А.В., Насимов Р.М., Дьяур Н.И., Бурмистров А.А., Петрунин Г.И., Попов В.Г., Сибгатулин В.Г., Линд Э.Н. Петрофизические свойства гранитоидов Нижнеканского массива: к вопросу о выборе участков для изоляции ВАО и ОЯТ // Геоэкология. 2002. № 4. С. 293-310.

- Лаверов Н.П., Величкин В.И., Омеляненко Б.И., Юдинцев С.В., Петров В.А., Бычков А.В. Изоляция отработавших ядерных материалов: геолого-геохимические основы. М.: ИГЕМ РАН, 2008<sub>1</sub>. 254 с.
- Лаверов Н.П., Петров В.А., Полуэктов В.В., Насимов Р.М., Хаммер Й., Бурмистров А.А., Щукин С.И. Урановое месторождение Антей - природный аналог хранилища ОЯТ и подземная геодинамическая лаборатория в гранитах // Геология рудных месторождений. 2008<sub>2</sub>. Т. 50, № 5. С. 387-413.
- Лукина Н.В. Нижнеканский гранитоидный массив: новейшие и современные тектонические движения, морфология и кинематика активных разломов и мегатрещин, современное поле напряжений. Возможности безопасного захоронения ВАО / Исследования гранитоидов Нижнеанского массива для захоронения РАО. СПб: 1998. С. 49-59.
- Мироненко М.В. Физико-химическая модель гидротермального минералообразования на месторождении Антей // Материалы по геологии урановых месторождений. М.: ВИМС, 1985. Вып. 93. С. 83-87.
- Наумов Г.Б., Мироненко М.В., Салазкин А.Н. и др. Новые данные по геохимическим условиям образования месторождений Стрельцовского рудного поля и их практическое значение // Материалы по геологии урановых месторождений. М.: ВИМС, 1985. Вып. 93. С. 65-82.
- Омеляненко Б.И., Петров В.А., Полуэктов В.В. Поведение урана в условиях взаимодействия горных пород и руд с подземными водами // Геология рудных месторождений. 2007. Т. 49, № 5. С. 429-445.
- Петров В.А. Исследования петрофизических свойств и напряженно-деформированного состояния пород в районах ПО «Маяк» и ГХК в связи с выбором полигонов для изоляции ВАО // Геология рудных месторождений. 2001. Т. 43, № 6. С. 478-494.
- Петров В.А., Леспинас М., Хаммер Й. Тектонодинамика флюидопроводящих структур и миграция радионуклидов в массивах кристаллических пород // Геология рудных месторождений. 2008<sub>1</sub>. Т. 50, № 2. С. 99-126.
- Петров В.А., Полуэктов В.В., Насимов Р.М., Щукин С.И., Хаммер Й. Природные и техногенные изменения напряженно-деформированного состояния пород на урановом месторождении в гранитах / Межд. конф. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. М.: ИФЗ РАН, 2008<sub>2</sub>. С. 168-170.
- Anderson E.B., Shabalev S.I., Savonenkov V.G., Lyubtseva E.F. Investigations of Nizhnekanskiy granitoid massif (Middle Siberia, Russia) as a promising site for deep geological disposal of HLW / Proc. DisTec'98. Hamburg, Germany, 1998. P. 105-110.
- Ask D. Evaluation of measurement-related uncertainties in the analysis of overcoring rock stress data from Äspö HRL, Sweden: a case study // Inter. J. Rock Mech. Min. Sci. 2003. N 40. P. 1173-1187.
- Äspö hard rock laboratory. 10 years of research. Stockholm: SKB, June 1996. 88 p.
- Blomqvist R., Ruskeeniemi T., Kaija J. et al. The Palmottu natural analogue project. Phase II: Transport of radionuclides in a natural flow system at Palmottu. European Commission: Report 19611, 2000.
- Everitt R., Brown A., Ejeckam R. et al. Litho-structural layering within the Archean Lac du Bonnet batholith, at AECL's Underground Research Laboratory, Southeastern Manitoba // J. Struct. Geol. 1998. N 9/10. P. 1291-1304.
- Frick U., Alexander W.R. The radionuclide migration experiment - overview of investigations 1985-1990. Wettingen, Switzerland: NAGRA Techn. Rep. NTB 91-04, 1992.
- Hammer J., Behlau J., Mingerzahn G. Teilgebiet «Kamennyj»: 3D-Modellierung der geologisch-geophysikalischen Erkundungsergebnisse mittels «openGeo» // Proceed. RW Disp. conf. M.: DBE-VNIPIPT, 2003. P. 31-34.

- Hudson J.A., Cornet F.H., Christiansson R. ISRM suggested methods for rock stress estimation – Part 1: Strategy for rock stress estimation // *Inter. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2003. N 40. P. 991–998.
- McKinley I.G., Alexander W.R. Constraints on the applicability of in situ distribution coefficient values // *J. Environ. Radioact.* 1992. № 15. P. 19–34.
- Min M.Z., Zhai J.P., Fang C.Q. Uranium-series radionuclide and element migration around the Sanerliu granite-hosted uranium deposit in southern China as a natural analogue for high-level radwaste repositories // *J. Chem. Geol.* 1998. N 144. P. 313–328.
- Müller W.H. The Grimsel Test Site: Geological background of the area and specific aspects of water flow // *NAGRA Bull.* 1988. P. 13–22.
- Pahl A., Heusermann St., Bräuer V., Glöggler W. Grimsel Test Site: Rock stress investigations. Hannover, Germany: BGR - NAGRA Rep. NTB 88–39E, 1989.
- Pérez del Villar L., Reyes E., Delgado A. et al. Argillization processes at the El Berrocal analogue granitic system (Spain): mineralogy, isotopic study and implications for the performance assessment of radwaste geological disposal // *J. Chem. Geol.* 2003. N 193. P. 273–293.
- Petrov V.A., Poluektov V.V., Zharikov A.V., Nasimov R.M., Diaur N.I., Terentiev V.A., Burmistrov A.A., Petrunin G.I., Popov V.G., Sibgatulin V.G., Lind E.N., Grafchikov A.A., Shmonov V.M. Microstructure, filtration, elastic and thermal properties of granite rock samples: Implication to the HLW disposal. *In*: P.K. Harvey, T.S. Brewer, P.A. Pezard, and V.A. Petrov (eds). *Petrophysical Properties of Crystalline Rocks*. Geological Society of London, Special Publication, N 240, 2005. P. 237–253.
- Read R.S., Chandler N.A., Dzik E.J. In situ strength criteria for tunnel design in highly-stressed rock mass // *Inter. J. Rock Mech. Min. Sci.* 1998. N 35. P. 261–278.
- Reinecker J., Heidbach O., Tingay M. et al. The 2005 release of the World Stress Map ([www.world-stress-map.org](http://www.world-stress-map.org)).
- Rock fractures and fluid flow: contemporary understanding and applications. Washington, D.C.: Nat. Acad. Press, 1996.
- Saito H., Yusa Y., Koide K. et al. Tono mine. Japan: JNC DI Tono Geosci. Center. 1999.
- Site selection factors for repositories of solid high-level and alpha-bearing wastes in geological formations. IAEA Technical Document Series TECDOC–177. Vienna, Austria, 1977.
- Smellie J.A.T., Karlsson F. The use of natural analogues to assess radionuclide transport // *J. Engineer. Geol.* 1999. N 52. P. 193–220.
- Talbot C.F., Sirat M. Stress control of hydraulic conductivity in fracture-saturated Swedish bedrock // *J. Engineer. Geol.* 2001. N 61. P. 145–153.
- The role of underground laboratories in nuclear waste disposal programmes. Paris, France: NEA-OECD Technical Series, 2001.
- Vieno T., Lehikoinen J., Löfman J. et al. Assessment of disturbances caused by construction and operation of ONKALO. Olkiluoto, Finland: Posiva Oy Rep. 2003–06, 2003.
- Yoshida H., Aoki K., Semba T. et al. Overview of the stability and barrier functions of the granitic geosphere at the Kamaishi Mine: relevance to radioactive waste disposal in Japan // *J. Engineer. Geol.* 2000. N 56. P. 151–162.