

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

# **ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ПРИРОДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И КАТАСТРОФЫ**

**Том II**

**ГЕОЛОГИЯ УРАНА,  
ГЕОЭКОЛОГИЯ, ГЛЯЦИОЛОГИЯ**

Москва  
2011

УДК 504.0  
ББК 26.2  
Г35

**Экстремальные природные явления и катастрофы** : в 2 т. / Отв. ред. А.О. Глико;  
ИФЗ РАН. – М. : ИФЗ РАН, 2010; 2011.

ISBN 978-5-91682-012-6

**Г35** Т. 2 : **Геология урана, геэкология, гляциология** / Отв. ред. В.М. Котляков, ИГ РАН;  
отв. сост. А.Л. Собисевич, ИФЗ РАН; – М. : ИФЗ РАН, 2011.

ISBN 978-5-91682-014-0

Во втором томе коллективной монографии изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований, связанных с изучением актуальных проблем современной геологии урановых месторождений, геэкологии и гляциологии, имеющих целью обеспечение безопасности населения и важных промышленных объектов на территории Российской Федерации. Анализируются основные промышленно-генетические типы урановых месторождений; рассмотрены новые прогрессивные технологии добычи радиоактивных материалов; изучено поведение актинидов в условиях долгосрочного хранения и захоронения отработанного ядерного топлива. Полученные научные результаты отражают современные проблемы безопасности атомной энергетики.

Приведены новые научные данные, связанные с изучением эволюции Антарктического и арктических ледниковых покровов, от состояния которых зависит уровень Мирового океана. Достаточно внимания уделено геэкологическим проблемам Северного Кавказа. Анализируются уникальные данные, полученные при проведении глубокого кернового бурения ледника на Западном плато вулканической постройки Эльбруса.

Изучены наиболее опасные геэкологические процессы на территории РФ, которые могут привести к гибели людей, ранениям и потере здоровья, а также к значительным материальным ущербам; разработан специальный ГИС-проект, который является готовым к использованию продуктом со всеми элементами, присущими автоматизированной информационной системе специального назначения, содержащей развернутые базы данных.

Полученные новые научные результаты и разработанные технологии уже востребованы на практике.

Для специалистов в области наук о Земле, строительства и чрезвычайных ситуаций.

УДК 504.0  
ББК 26.2

The Volume II of the collective monograph presents the results of both theoretical and experimental studies of actual problems of modern geology of uranium deposits, geoecology and glaciology in order to mitigate issues on public safety and potentially hazardous industrial facilities and consequent risks on the territory of Russian Federation. Primary types of industrial uranium ore deposits are analysed, new progressive technologies of prospecting of radioactive materials are considered, the behaviour of actinides in long-time storages and nuclear waste burial sites are studied. The results obtained represent modern safety problems of nuclear power engineering.

New scientific data related to evolution of glaciers in Arctic and Antarctica governing the global level of world ocean are presented. Specific attention is paid to geoecological problems in Northern Caucasus. Genuine data gathered in the course of deep core drilling on the Western plateau of the Elbrus volcano.

Most significant hazardous geoecological processes on the territory of Russian Federation, threatening populated areas in terms of human health and injury, substantial property damage are studied. The specialized geographical information system (GIS) is the database driven product with high level of automation and it has been developed in frames of the actual research initiative.

The new fundamental scientific results obtained and the new technologies developed are of particular interest for practical applications.

The book will satisfy the needs of specialists in Earth sciences, industrial construction applications and hazard assessment.

ISBN 978-5-91682-014-0  
ISBN 978-5-91682-012-6

© Российская академия наук, 2011  
© Коллектив авторов, 2011

# **ИЗУЧЕНИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА УРАНОВОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ В ГРАНИТАХ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОЯТ**

<sup>1</sup> Учреждение Российской академии наук Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН

<sup>2</sup> Учреждение Российской академии наук Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

<sup>4</sup> ОАО «Приаргунское производственно горно-химическое объединение»

<sup>5</sup> Федеральное ведомство по геонаукам и природным ресурсам (БГР), Германия

Опыт работы подземных исследовательских лабораторий (ПИЛ) в гранитных массивах Швеции (Аспё), Канады (Уайт Шел), Швейцарии (Гримзель), Финляндии (ОНКАЛО) и Японии (Мицунами) необходимо использовать при создании российской ПИЛ, строительство которой осуществляется в Красноярском крае в районе Нижнеканского гранитоидного массива. Этот опыт (трассерные, нагревательные, гидравлические, геомеханические и другие тесты) свидетельствует, что для выявления механизмов миграции и накопления радионуклидов (актинидов) в трещинно-поровых неоднородно деформированных породах крайне необходимы данные по урановым месторождениям. Они являются природными аналогами процессов, которые, как ожидается, будут протекать на объектах долговременного хранения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), которое на 95 % состоящего из  $UO_{2+x}$  (минералы группы настурана-уранинита), размещенных в глубинных геологических структурах. В гранитных массивах такие месторождения: Эль Беррокал (Испания), Палмотту (Финляндия), Санерли (Китай) и Камаishi (Япония). Однако различия в геотектонических, гидрогеологических, окислительно-восстановительных обстановках и других условий в районах расположения ПИЛ и месторождений формируют спектр неопределенностей в долгосрочных сценариях развития событий и уровня безопасности оцениваемых хранилищ. Разрешить эти неопределенностей возможно, если подземная лаборатория оборудована на базе уранового месторождения, рудные тела которого залегают на глубинах, соответствующих положению ра-

бочего горизонта хранилища ОЯТ. В настоящее время единственным примером такого пространственного совмещения является 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 месторождение Антей изучается с целью детальной разработки вопросов долговременного хранения ОЯТ в глубинных структурах гранитных массивов. Ниже представлены отдельные результаты изысканий на месторождении Антей, намечаются направления дальнейших исследований и пути приложения полученных данных для научно-методического обеспечения работ по созданию ПИЛ и хранилища ОЯТ 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 механически и гидравлически активными разрывами. Эта информация необходима для инженерно-геологических расчетов и планирования направлений 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 природным и техногенным нагрузкам детально изучается в подземных лабораториях [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], Гrimзель 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 варьируется в зависимости от целей и задач исследований, а также их продолжительности и объема вложенных средств.

Анализ опубликованных данных показывает, что одно из важнейших направлений изысканий 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 околос трещинном пространстве, гипергенными изменениями вмещающих пород из-за подтока кислородсодержащих вод и другими сопутствующими физико-химическими преобразованиями [Rock fractures..., 1996]. Сочетание этих процессов 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 околос трещинном пространстве влечет за собой изменение обстановки перемещения радионуклидов и замену одних транспортных механизмов другими [Петров и др., 2008]. 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 гидро-

термальных урановых месторождениях. Здесь гипогенная урановая минерализация, локализованная в относительно ограниченном объеме трещинно-порового пространства, при определенных термобарических и физико-химических условиях может находиться без существенных преобразований сотни миллионов лет. Поскольку ОЯТ на 95 % состоит из UO<sub>2</sub> (минералы группы настурдана-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 разреза 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 близнейтральные 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 (актинидов) 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 Беррока 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 (актинидов) в окислительных и восстановительных условиях в различной степени водонасыщенных породах на этих объектах ограничены, так как их глубокие горизонты вскрыты лишь единичными скважинами, а не разветвленной системой доступных для обследования горных выработок.

В связи с этим в контексте материалов по урановым месторождениям и лабораториям в гранитных массивах охарактеризуем 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 под-

земной лаборатории по изучению геодинамических условий на этих глубинах.

## МЕСТОРОЖДЕНИЕ АНТЕЙ – ПРИРОДНЫЙ АНАЛОГ ХРАНИЛИЩА ОЯТ

Жильно-штокверковое месторождение Антей расположено в Юго-Восточном Забайкалье в пределах рудонасыщенной Стрельцовской кальдеры (рис. 1), сформированной в процессе позднемезозойской тектономагматической 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 анализируются 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 (рис. 2). 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 (рис. 3). Они сформировались в палеозойский этап гидротермальной активности и относятся к типу метамагматических, т. е. образовавшихся в самом конце процесса кристаллизации гранитоидной магмы. Зоны калишпатизации формиру-

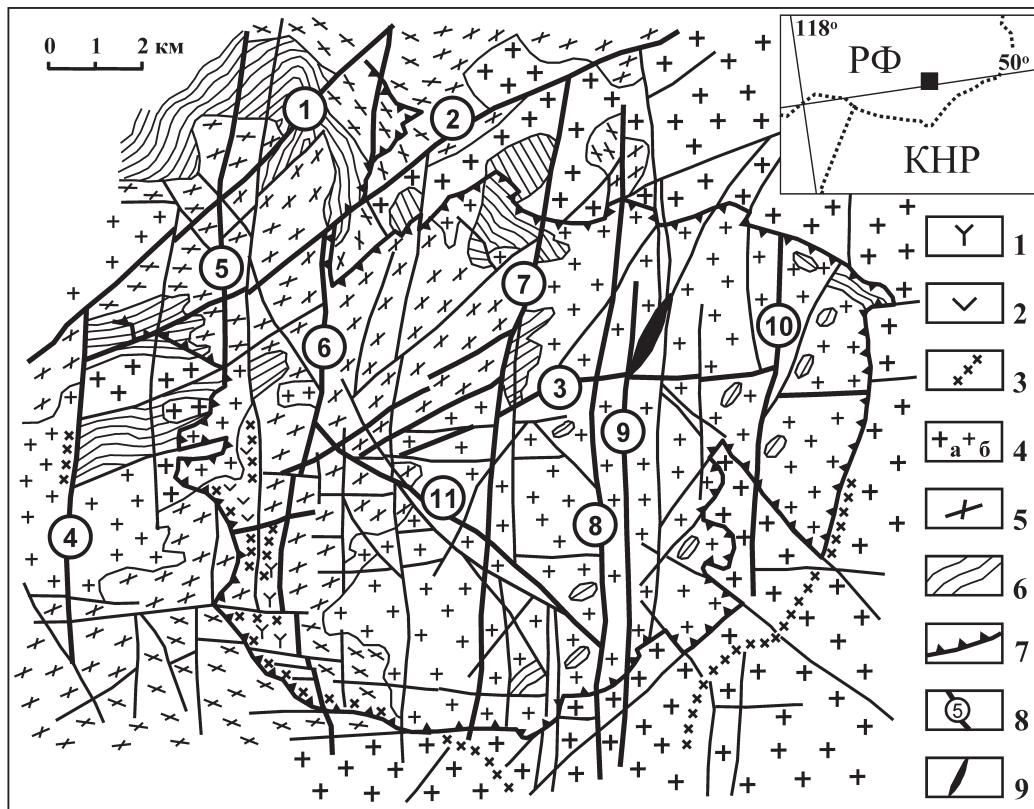


Рис. 1. Схема геологического строения фундамента Тулукевской вулкано-тектонической структуры (по [Ищукова, 2007] с изменениями).

1 – риолиты жерловой фации; 2 – фельзиты жерловой фации; 3 – дайки кварцевых порфиров, сиенит-порфиров, граносиенит-порфиров; 4 – позднепалеозойские граниты, гранодиориты, диориты, мигматиты, выходящие на поверхность (а) и вскрытые скважинами (б) под чехлом осадочно-вулканогенных пород; 5 – раннепалеозойские гнейсовидные граниты, гранодиориты; 6 – протерозойские гранитогнейсы, раннепротерозойские и архейские (?) меланократовые гнейсы, амфиболиты, метабазиты, пироксениты, кристаллические сланцы, доломиты, известняки; 7 – разломы, ограничивающие вулкано-тектоническую структуру; 8 – разломы, зоны разломов и их номера: 1 – Урулунгуевская, 2 – Северная, 3 – Аргунская, 4 – Талан-Гозогорский, 5 – Флюоритовый, 6 – Меридиональная, 7 – Мало-Тулукевская, 8 – Глубинная, 9 – Центральная, 10 – Широндукайская, 11 – Тулукевская; 9 – месторождение Антей

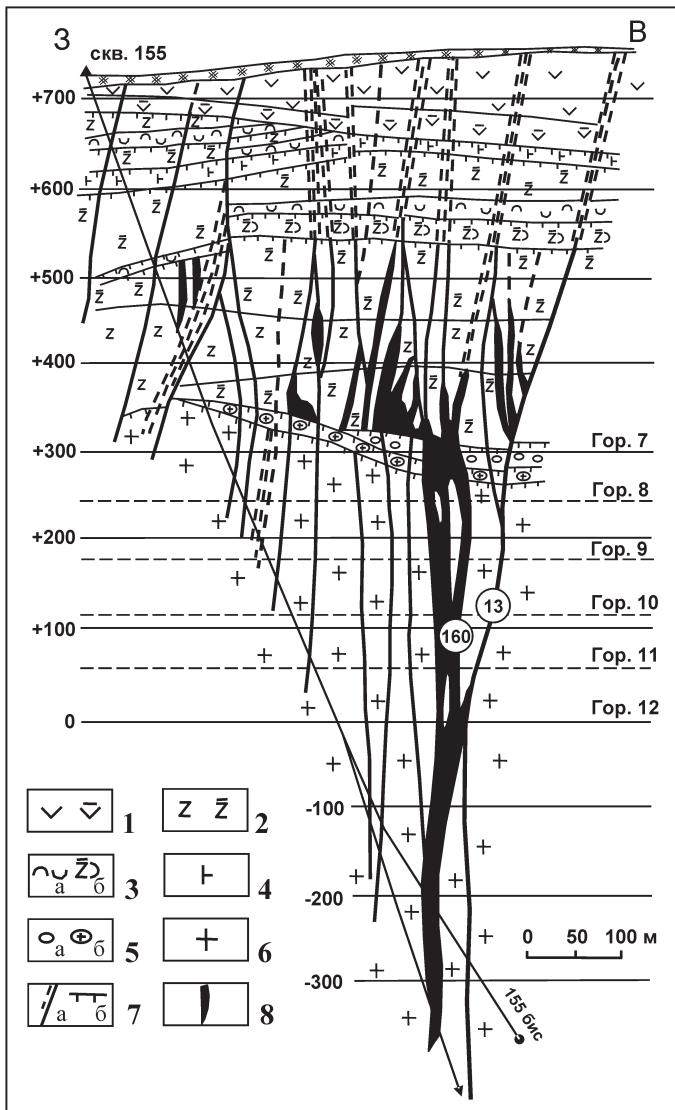


Рис. 2. Геологический разрез месторождения Антей (по [Ишукова, 2007] с изменениями).

1 – фельзиты, 2 – трахидациты, 3 – туфы (а) и туфолавы (б) трахидацитов, 4 – базальты, 5 – конгломераты (а) и структурный элювий гранитов (б), 6 – гранитоиды, 7 – крутопадающие разломы (а) и пологие срыва (б), 8 – рудные тела. Над крутопадающими разломами 160 и 13 месторождения Антей расположены рудные тела Центрального участка месторождения Стрельцовское, локализованные в осадочно-вулканогенном чехле. Слева показана шкала высот над уровнем моря, справа – положение в разрезе и номера горизонтов горных выработок

ют прототектонические структуры, которые вытянуты в субширотном направлении в виде жилообразных тел мощностью до первых десятков м.

Основная роль в локализации уранового оруденения принадлежит разломам ССВ-ЮЮЗ ( $30^\circ$ ) про-стириания, которые секут субширотные элементы прототектоники. Важнейшие из них – разломы 13, 161, 160 и 160 г. Последние три оперяют разлом 13 со стороны висячего бока и вместе с ним образуют «рудоносную зону» мощностью 20–60 м. Верхняя часть зоны располагается на глубине ~400 м,

а низы ее пересечены разведочными скважинами на глубине ~1300 м от дневной поверхности. Рудоносная зона объединяет крутопадающие жилообразные рудные тела с брекчевыми, прожилково-вкрапленными 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 простириания.

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, магнезиальный 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 неизмененные 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 распространяются в неизмененные породы. Мощность метасоматитов вдоль рудоконтролирующих разломов может достигать 15 м.

Пострудные (постуранные) аргиллизиты проявились в виде узких зон, приуроченных к разрывным нарушениям, контролирующими урановое оруденение. В их состав входит смектит и каолинит или только смектит, которые замещают полевошпатовую часть породы. Эти процессы часто сопровождаются растворением оклорудного 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 минераль-

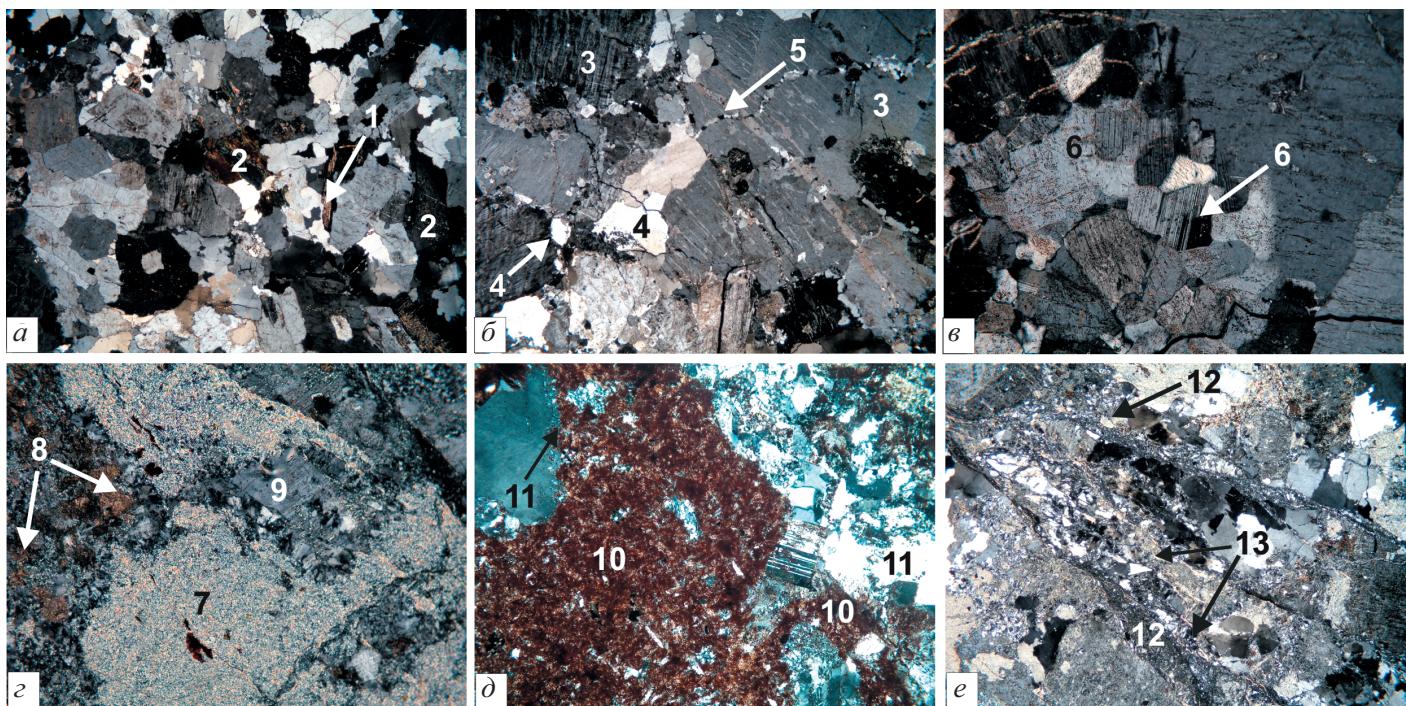


Рис. 3. Породы месторождения Антей.

а – неизмененный биотитовый гранит с гипидиоморфнозернистой гранитовой структурой; б – высокотемпературный калишпатит с порфиробластами микроклина (3) и характерными включениями гранитного (4) и прожилковидного кварца (5); в – высокотемпературный альбитит с тонкосдвойникованным, частично шахматным альбитом (6); г – гидрослюдизиты (7) с метасоматическими карбонатом и хлоритом (8) и частичным замещением гидрослюдой калишпата (9); д – рудосопровождающий альбититовый метасоматит; альбит плохо сдвойникован, интенсивно импрегнирован гематитом (10) и отчетливо замещается кварцем (11); е – зоны интенсивного катаклиза и брекчирования с развитием окварцевания (12) и микропрожилков карбоната (13)

ных парагенезисов [Мироненко, 1985]. Установлено, что гидротермальный процесс, с которым связано образование урановых руд, протекал в интервале температур 180–140 °С в практически изотермических условиях. Растворы характеризовались высокой углекислотностью (от  $n \cdot 10^2$  до  $n \cdot 10$  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) гидрослюд замещалась альбитом, уменьшалось количество кварца и откладывался настуртан ( $UO_{2,25}$ ).

Обобщая изложенные данные, можно выделить следующие элементы геологического строения месторождения Антей, воспроизводящие компоненты мультибарьерной системы объекта длительного хранения ОЯТ (рис. 4):

- рудные тела сложены настуртаном (аналог ОЯТ);
- рудные тела окружены «пакетами» гидротермально-измененных пород (сочетание гидрослюдизитов и пострудных низкотемпературных

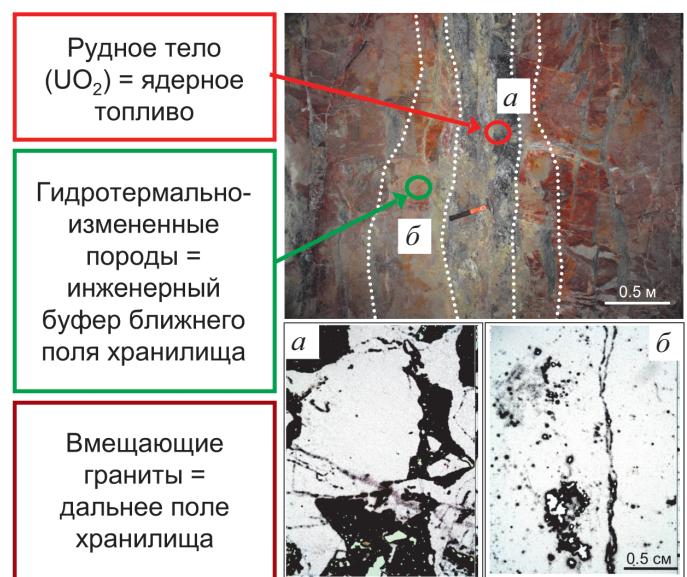


Рис. 4. Элементы геологического строения месторождения Антей, воспроизводящие компоненты мультибарьерной системы объекта длительного хранения ОЯТ в глубинных условиях гранитных массивов.

Показан характер распределения урана (черная засветка) в ядре разлома (а) и в зоне гидротермально-метасоматических изменений (б) по данным осколковой радиографии. Приведен фрагмент рудовмещающего разлома 160 на горизонте 11

- минеральных ассоциаций создает аналог буфера-забивки);
- «пакеты» метасоматитов окружены толщей неизмененных вмещающих гранитов (комбинация инженерно-нарушенной зоны горных выработок и пород дальнего поля хранилища);
  - во вмещающих породах проявлены геомеханически нестабильные и гидравлически активные разрывы, что также следует ожидать в районе и на глубинах расположения хранилища.

Сочетание этих элементов позволяет рассматривать месторождение как природный аналог хранилища ОЯТ. Базовый сценарий развития событий состоит в том, что изолированное в течение длительного времени ОЯТ (первичные настурановые руды) практически одномоментно (в масштабе геологического времени) разрушается активизированной зоной разлома и экспонируется для окислительных процессов со стороны инфильтрующихся кислородсодержащих вод и атмосферных газов в горных выработках. Этот сценарий подразумевает реализацию механизма «мгновенной» деформации геологических структур массива, например в связи с сейсмодислокациями. Также может рассматриваться сценарий разрушения хранилища при низких (криповых) скоростях деформирования массива.

Для оценки различных сценариев развития событий изучается каркас разрывных нарушений, петрофизические свойства и напряженно-деформированное состояние пород месторождения, которое в этом контексте рассматривается как подземная геодинамическая лаборатория.

ставу, петрофизическими свойствами и структурному контролю (рис. 5).

При создании модели использовались оцифрованные погоризонтные планы и разрезы масштаба 1:500. Применялся пакет программ «openGEO», в котором обработка всего набора данных проводилась с помощью метода триангуляции [Хаммер и др., 2009]. 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-ЮВ (25–30°) простирания и крутого (75–85°) ЮВ падения, формирующих эшелонированный левосторонний сдвиг. Суммарная амплитуда горизонтальных смещений, определяемая по «расхождению» разрывов отрывного характера с одновозрастной минерализацией, достигает 40 м. Швы выполнены пакетами глиники 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.

Зона разлома 13 также образована несколькими кулисообразно расположенным швами ССВ-ЮВ простирания и крутого (75–80°) падения на СЗ. Разлом смещает контакт структурных этажей фундамента и чехла кальдеры с суммарной амплитудой до 15 м, рассекает чехол и трассируется на поверхности. Глубже горизонта 11 зоны разломов 160 и 13, имеющие в плане общее простиранение, 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.

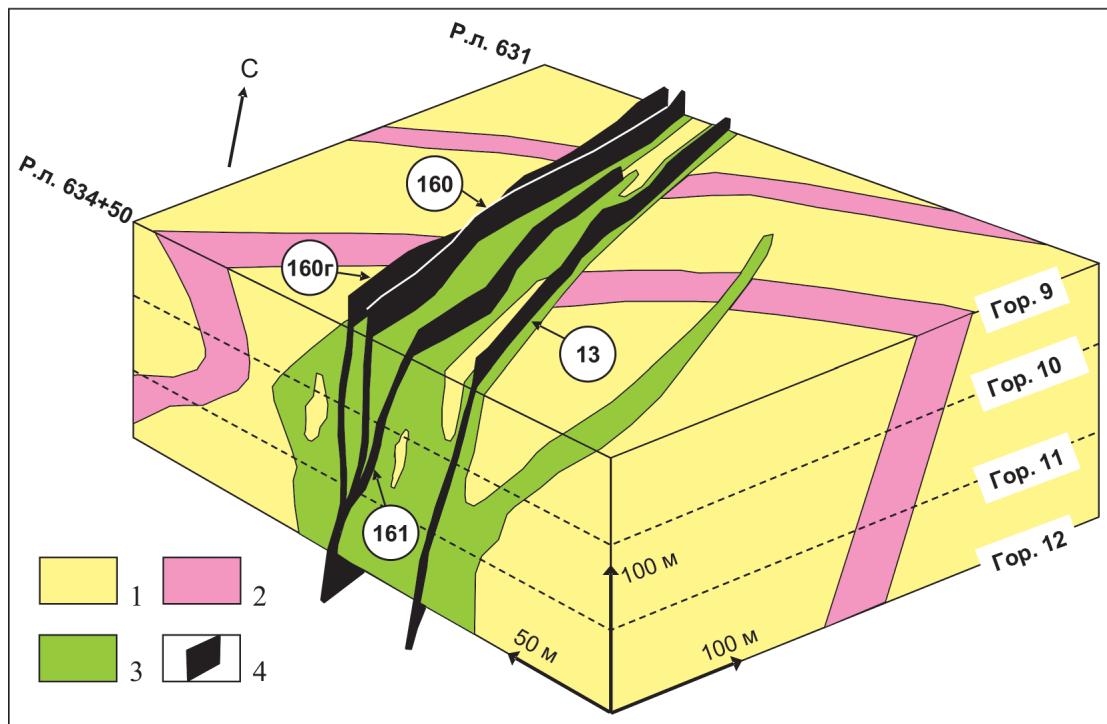
Различия в составе и интенсивности проявления разновозрастных метасоматитов на западном фланге, в межразломном пространстве и на восточном фланге месторождения отражаются в петрофизических и геомеханических параметрах пород. Так, наибольшими значениями предела прочности на одноосное сжатие и предела упругости обладают окварцованные, а наименьшими – интенсивно преобразованные (гидрослюдизированные и аргиллизированные) разности пород. Минимальные значения упругих параметров (скорости Р- и S-волн в сухом и водонасыщенном состоянии,

## МЕСТОРОЖДЕНИЕ АНТЕЙ – ПОДЗЕМНАЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ

Благодаря своей хорошей вскрытии месторождение Антей предоставляет широкие возможности для изучения природных и техногенных геодинамических процессов и их влияния на устойчивость среды, в которой размещается ОЯТ.

Детальные исследования были реализованы в блоке пород в плане 350 м длиной и 150 м шириной, а в разрезе от горизонта 9 (абс. отм. +182 м) до горизонта 12 (абс. отм. 0 м), который расположен 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 минерально-химическому со-



**Рис. 5.** Упрощенная трехмерная модель разломов и блоков разновозрастных метасоматитов нижней части месторождения Антей, созданная с помощью пакета программ «openGEO».

1 – вмещающие граниты; 2 – калишпатиты и альбититы; 3 – гидрослюдизиты; 4 – плоскости разломов (указаны номера). Жилообразные тела палеозойских калишпатитов и альбититов связаны с элементами прототектоники. Они секутся разломами 13, 160, 161 и 160г, которые контролируют ореолы мезозойских гидрослюдизитов, урановорудные тела, рудосопровождающие и пострудные изменения пород. Р.л. – разведочная линия, гор. – горизонт горных выработок. Стрелка показывает направление на север (С)

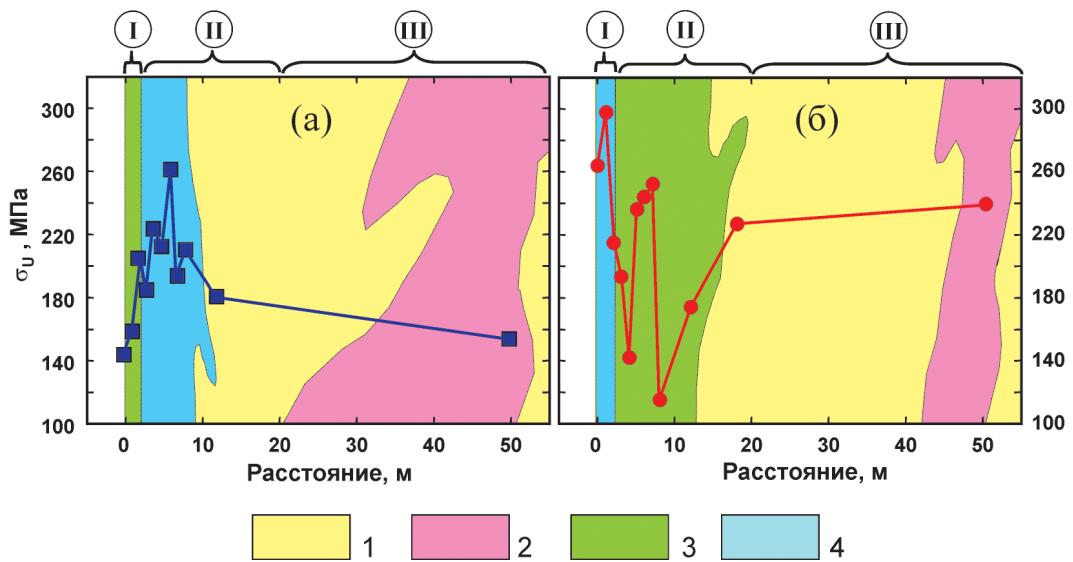
модули Юнга, сдвига и объемного сжатия, коэффициент Пуассона) характерны для ядер разломов, где породы подвержены интенсивным гидрослюдистым изменениям и аргиллизации, а максимальные – для интенсивно окварцованных ядер разломов. Наиболее ярко эти отличия проявлены в основном сместителе разлома 13, где на уровне горизонта 9 развиты гидрослюдистые изменения, а на уровне горизонта 11 – интенсивное окварцевание. Основные вариации упруго-прочностных параметров наблюдаются в зонах динамического влияния разломов, но повышение или понижение значений зависит от пространственного соотношения типов метасоматитов. Например, значения параметров повышаются в случае перехода от аргиллизированных и гидрослюдизированных (упруго-пластичная среда) к более окварцованным (упруго-хрупкая среда) разностям пород и, наоборот, понижаются по мере удаления от окварцованных ядер разлома к упруго-пластичным гидрослюдизированным и аргиллизированным породам зоны динамического влияния (рис. 6).

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 (рис. 7). 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., 2009].

Проведена реконструкция динамики изменения тектонического поля напряжений в горном массиве. В результате установлено, 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 скальывающих напряжений, изменение характера напряженно-деформированного состояния пород, смена направлений смещений в разрывных нарушениях и обстановки минералообразования (рис. 8).

Первый этап тектогенеза восстановливается по линейности высокотемпературных калишпатитов и аль-



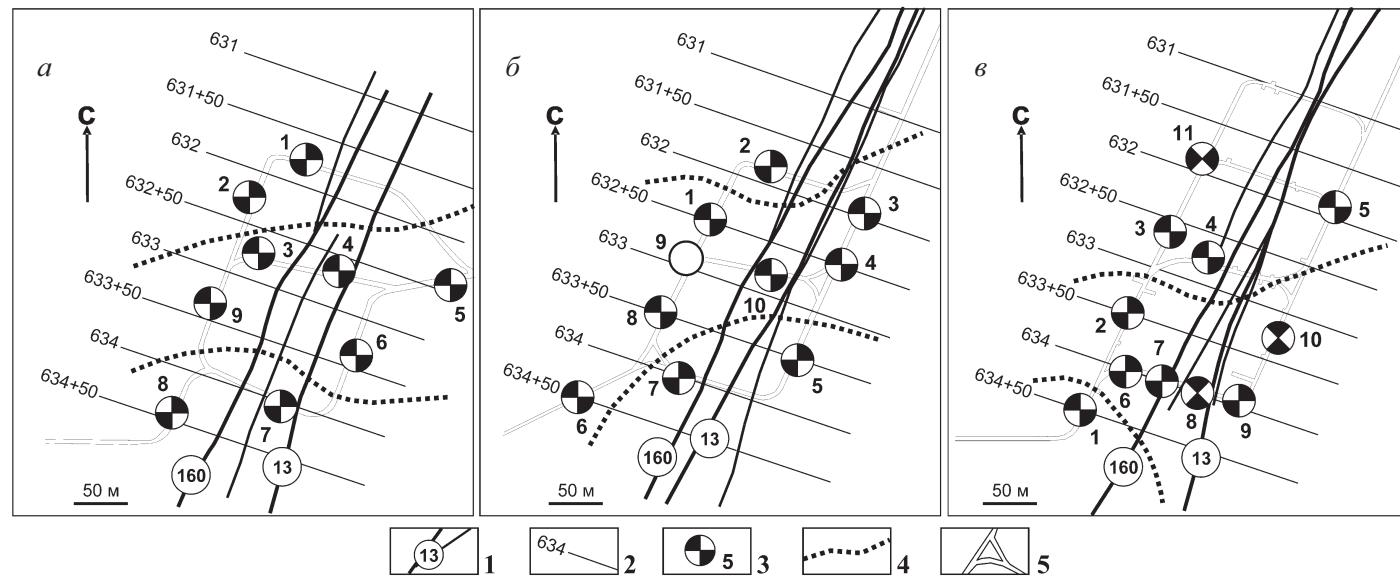
**Рис. 6.** Изменение предела прочности пород ( $\sigma_u$ ) как функция расстояния от основного смещителя разлома 13 на горизонтах 9 (а) и 11 (б).

1 – вмещающие граниты, 2 – калишпатиты и альбититы, 3 – гидрослюдиты, 4 – окварцевание. Архитектура зоны разлома: I – ядро, II – зона динамического влияния, III – протолит (относительно ненарушенная порода)

бититов, что указывает на субширотную ориентировку оси максимального сжатия ( $\sigma_1$ ).

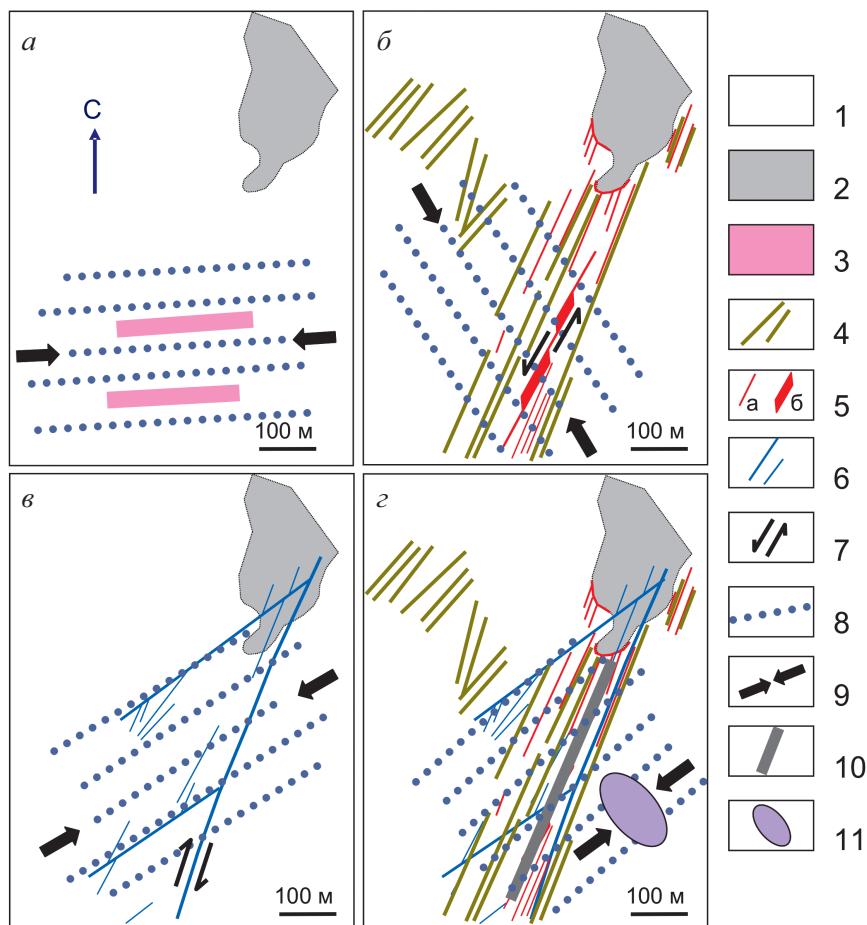
Второй этап тектогенеза объединяет по времени процессы предрудной гидрослюдизации, рудосопровождающих альбит-гематитовых изменений, включая формирование криптокристаллического кварца, и ру-

дообразования. Исходя из морфологии рудных тел, на этом этапе при СЗ-ЮВ ориентировка оси  $\sigma_1$  по зоне разлома 160 происходили левосторонние сдвиговые перемещения с последовательным приоткрытием и заполнением рудным веществом полостей разрывов, расположенных в плоскости  $\sigma_1\sigma_2$ . Тектони-



**Рис. 7.** Характер анизотропии упругих свойств пород на горизонтах 9 (а), 10 (б) и 11 (в) месторождения Антей.

1 – основные разломы и их номера; 2 – разведочные линии и их номера; 3 – направление увеличения (черные сектора) скоростей продольных и сдвиговых волн в горизонтальной плоскости ориентированных образцов (указаны номера) при водонасыщении, отсутствие секторов указывает на изотропию упругих свойств; 4 – границы зон разнонаправленного увеличения скоростей продольных и сдвиговых волн; 5 – контуры горных выработок. Стрелки показывают направление на север (С)



**Рис. 8.** Ориентировка оси главных сжимающих напряжений и преобразования пород на основных этапах тектогенеза (на примере горизонта 10):

*а* – ранние высокотемпературные метасоматиты (калишпатиты и альбититы), *б* – предрудная гидрослюдизация и рудосопровождающие гематит-альбитовые изменения, *в* – пострудная аргиллизация (каолинит, смектит), *г* – современное напряженно-деформированное состояние горного массива. 1 – граниты; 2 – базальные конгломераты; 3 – калишпатиты и альбититы; 4 – гидрослюдизиты; 5 – альбит-гематитовые изменения (*а*) и рудные тела (*б*); 6 – пострудная минерализация; 7 – направление перемещений вдоль плоскостей разломов; 8 – траектории главных сжимающих напряжений; 9 – направление усилий максимального сжатия; 10 – закладочная масса в выработанном пространстве вдоль рудовмещающего разлома 160; 11 – контур (вне масштаба) одного из рудоспусков после горного удара в мае 2005 г. Стрелка показывает направление на север (С)

ческие 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 выдержаных 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 раз-

рывов, выполненных пострудной минерализацией, тип перемещений вдоль зоны разлома интерпретируется как правосторонний сдвиг или сдвиго-сброс.

Четвертый (современный) этап тектогенеза унаследует основные черты предыдущего этапа, когда траектории максимальных сжимающих усилий ( $\sigma_1$ ) протягиваются в СВ-ЮЗ направлении. На региональном уровне 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.

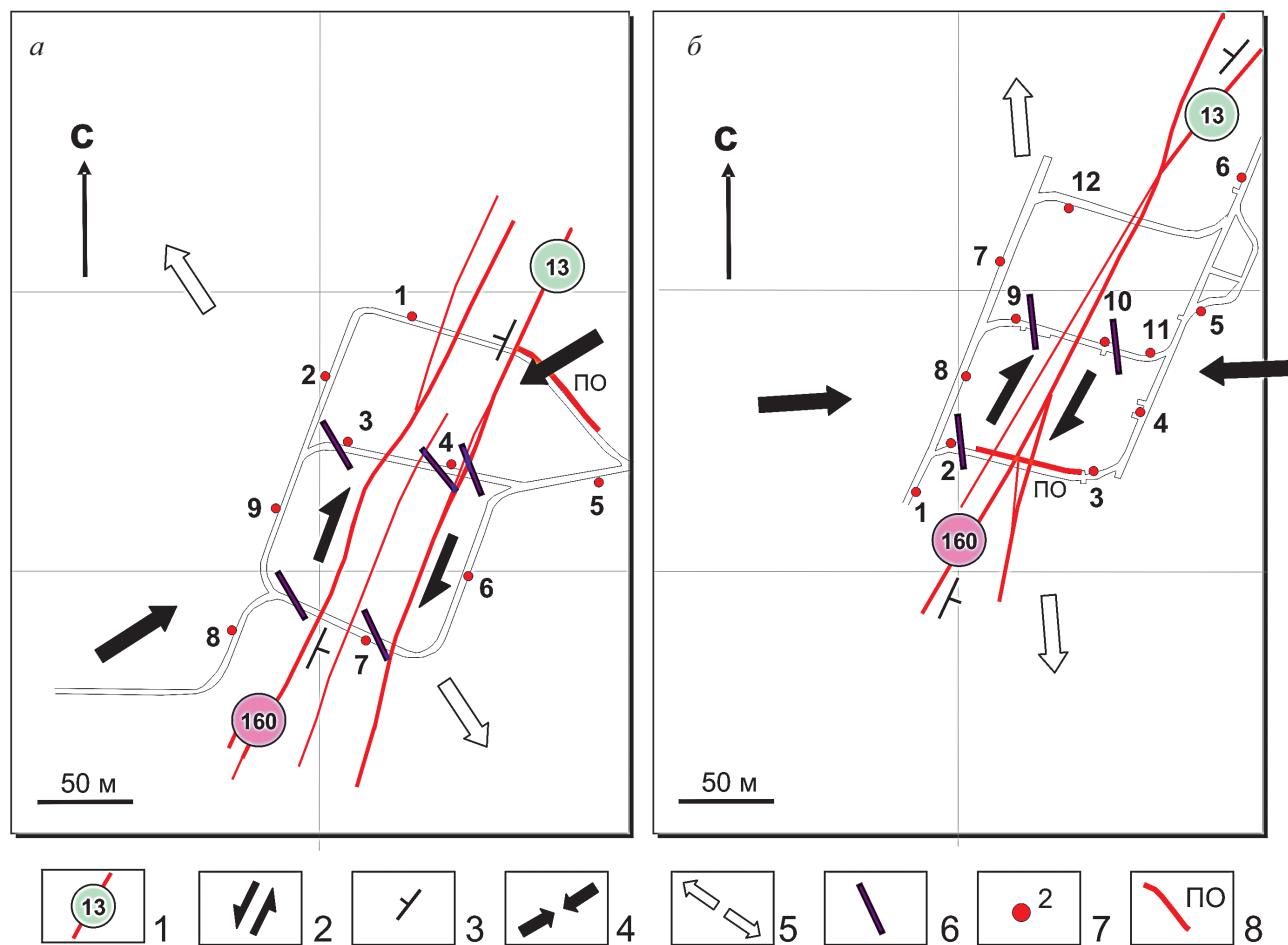
Изучение деформаций стенок скважин, шахт, восстающих и рудоспусков – один из наиболее простых

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 стены 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 (рис. 9). 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 концентриру-

ются 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 C3-ЮВ ориентировку оси  $S_H$ , но не исключается в связи с возможностью разнонаправленных и разноамплитудных перемещений в копланарных сегментах разлома.

Примечательно, что области наиболее интенсивных деформаций хрупкого разрушения приурочены к жилообразным телам упруго-прочных калишпатитов и альбититов, которые в массиве упруго-пластичных гранитов выступают в роли «кон-



**Рис. 9.** Изменение ориентировки оси максимального горизонтального сжатия ( $S_H$ ) на гипсометрических уровнях горизонтов 9 (а) и 12 (б), установленное по удлинению контуров вертикальных выработок.

1 – основные разломы и их номера; 2 – направление смещений вдоль плоскостей разломов; 3 – направление падения плоскости смесятеля; 4 – ориентировка оси максимального горизонтального сжатия ( $S_H$ ); 5 – ориентировка оси минимального горизонтального сжатия (растяжения) ( $S_h$ ); 6 – направление оси удлинения контуров вертикальных выработок; 7 – точки отбора ориентированных штуков; 8 – профили опробования. Стрелки показывают направление на север (С)

центраторов» наведенных (внешних) напряжений. Такое геомеханическое поведение калишпатитов и альбититов характерно для мезозойского рудообразования и для этапа современных деформаций. В процессе рудообразования в узлах пересечения субширотных тел калишпатитов и альбититов с субмеридиональными флюидоподводящими разломами создавались тектонофизические и физико-химические условия, благоприятные для формирования крутопадающих рудных столбов. Это подтверждено специализированным структурно-геологическим и минералого-петрографическим картированием в горных выработках, а также расчетной математической моделью гравитационного напряженного состояния пород на период рудообразования. Что касается современных деформаций горного массива, то результаты мониторинга акустической эмиссии, проводимого специалистами ИГД ДВО РАН [Рассказов и др., 2009], показывают, что области концентраций акустических событий пространственно тяготеют именно к жилообразным телам калишпатитов и альбититов.

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 смесятелей 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 подземных лабораториях Аспэ [Talbot, Sirat, 2001; Ask, 2003], Гrimзель [Pahl et al., 1989] и Уайт Шел [Read et al., 1998]. Поэтому на различных гипсометрических уровнях месторождения Антей необходимо проводить мониторинг геомеханических процессов инструментальными методами с увязкой получаемых параметров в трехмерной геологической модели.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В настоящее время в экономически развитых странах осуществляются широкомасштабные исследования по решению задачи длительного контролируемого хранения накопленного ОЯТ в глубинных структурах массивов кристаллических пород. Важнейшее направление этих работ – определение долговременной устойчивости вмещающей среды и подземной инфраструктуры объектов 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 фильтрующем 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]. Основные из них: 1) сложность оценки влияния дисперсии (рассеяния) на понижение концентрации трассеров в движущемся потоке подземных вод; 2) тесты проводятся на небольшом количестве изолированных пакерами трещин в течение нескольких недель, реже первых месяцев; 3) расчет скорости переноса вещества основан на данных о современном состоянии разрывов и их гидравлических свойствах (морфология стенок, ширина раскрытия трещин, извилистость, водопропиток, коэффициенты фильтрации и т. д.). Так же велика вероятность изменения условий переноса радионуклидов из-за реактивации каркаса гидравлически активных разрывов как отклик на природное или техногенное деформационное воздействие на фоне нестационарного теплового поля.

Проведенный сбор, анализ и обобщение данных по взаимосвязи между различными факторами контроля миграции радионуклидов в массивах кристаллических пород в контексте изоляции теплогенерирующих ядерных материалов показал, что такая взаимосвязь может быть сведена к матрице основных термо-гидромеханических и химических процессов (рис. 10). Они сгруппированы в две категории: приво-

Процессы, приводящие к фиксации радионуклидов			
<b>Термические</b>	Конденсация пара Диффузионный транспорт	Минералообразование и заполнение трещин Термохимическое паровое отложение вещества	Закрытие межзерновых границ
Формирование термоконвективной ячейки Адвективный транспорт	<b>Гидравлические</b>	Восстановительные химические реакции Изъятие ионов Молекулярная фильтрация (Ад)сорбция	Слияние трещин Связанная пористость (с постоянным коэффициентом диффузии)
Термохимический паровой перенос и переотложение вещества	Окислительные химические реакции Коллоидный транспорт	<b>Химические</b>	Механохимическое заполнение полостей Инкрустация межзерновых границ
Терморазуплотнение Открытие межзерновых границ	Гидроразрыв Формирование каналов Ограниченнная матричная диффузия	Механохимическое выветривание Растворение на межзерновых границах	<b>Механические</b>

**Рис. 10.** Матрица основных процессов термо-гидромеханических и химических преобразований пород, обеспечивающих миграцию или задержку радионуклидов в ближнем и дальнем полях объекта изоляции теплогенерирующих ядерных материалов в массивах кристаллических пород

дящие к миграции (высвобождению) радионуклидов и приводящие к задержке (фиксации, концентрированию) радионуклидов. Ключевые процессы и явления расположены в матрице по диагонали, а взаимодействующие компоненты по обе стороны от нее. Ранее такой матричный принцип предлагался для сравнительного анализа инженерно-геологических данных [Hudson, 1989], но расширен нами применительно к процессам в ближнем и дальнем полях объектов изоляции теплогенерирующих ядерных материалов (без учета влияния микробиальной активности на редокс-потенциал среды). Матрица позволяет очертить круг вопросов, на которые до сих пор не даны удовлетворительные ответы. Прежде всего – это пространственно-временные соотношения между этапами деформации массивов кристаллических пород, динамикой циркуляции многокомпонентной (твердая, жидкая и газообразная фазы) системы и механизмами миграции радионуклидов в различных окислительно-восстановительных условиях. Этот вопрос не может быть решен в исследовательских, в том числе подземных, лабораториях. Поэтому для установления динамики процессов миграции радионуклидов и обоснования барьерных свойств трещиноватых неоднородно деформированных пород необходимо привлекать материалы 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 конкретном блоке земной коры 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 и обстановках, полученная информация имеет ценность в контексте общих и предварительных оценок. Данное утверждение справедливо и для подземных исследовательских лабораторий. Они расположены в разных 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 собой пример неоднородности: при сравнении участков «Верхне-Итатский» (центральная часть массива) и «Енисейский» (гранитогнейсовое обрамление массива) обнаружаются их следующие основные различия: по структурно-тектонической позиции [Anderson *et al.*, 1998; Белов *и др.*, 2007]; по степени проявленности неотектонических и современных активных разрывных нарушений [Лукина, 1998]; по минерально-петрографическому составу и структурно-петрофизическим свойствам

пород [Лаверов и др., 2002; Petrov *et al.*, 2005]; по напряженно-деформированному состоянию пород [Петров, 2001; Морозов и др., 2008]; по гидрохимии подземных вод [Гутало 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 создаваться 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 геологического разреза.

Представляется, что наиболее рационально отработать методику изучения 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 в ИГЕМ РАН работ 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 результаты проведенных геолого-структурных, петрографо-минералогических, тектонофизических и структурно-петрофизических исследований сводятся к следующему:

1. На различных гипсометрических уровнях геологического разреза прослеживается отчетливая зависимость петрофизических свойств пород от характера и интенсивности их метасоматической проработки. Установлена динамика формирования каркаса разрывных нарушений и неоднородность современно-го 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. Именно на такой основе следует разрабатывать концептуальные и числовые модели геодинамики массива, а также выделены участки 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 (комбинация инженерно-нарушенной зоны горных выработок и пород дальнего поля хранилища); г) во вмещающих породах проявлены геомеханически нестабильные и 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 рассекается вновь образованным или реактивированным 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 следует рассматривать и сценарии разрушения хранилища при более низких (криповых) скоростях деформирования пород.
3. Особенности геологического строения месторождения и напряженно-деформированного состояния вмещающих его 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 геодеформационном поле. Однако, в отличие от имеющихся подземных лабораторий, инфраструктура горных выработок месторождения Антей и наличие урановорудных концентраций, сосредоточенных в зонах разломов, позволяют решать более широкий спектр задач. Одна из них – раскрытие взаимосвязи между геомеханическими процессами, развивающимися на различных гипсометрических уровнях горного массива, и миграцией радионуклидов в соответствую-

ших 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 изысканий в российской подземной лаборатории в районе Нижнеканского гранитоидного массива.

*Работа проводилась при финансовой поддержке Программы № 4 фундаментальных исследований Президиума РАН, направление № 5.*

## ЛИТЕРАТУРА

- Андреева О.В., Головин В.А. Метасоматические процессы на урановых месторождениях Тулукевской 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., Сибгатуллин В.Г., Линд Э.Н. Пetroфизические 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., Омельяненко Б.И., Юдинцев С.В., Петров В.А., Бычков А.В. Изоляция отработавших ядерных материалов: геолого-geoхимические 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 мегатрецин, современное поле напряжений. Возможности безопасного захоронения ВАО // Исследования гранитоидов Нижнеканского 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.
- Морозов В.Н., Колесников И.Ю., Белов С.В., Татаринов В.Н. Напряженно-деформированное состояние Нижнеканского массива – района возможного захоронения радиоактивных отходов // Геоэкология. 2008. №3. С. 232–243.
- 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.
- Омельяненко 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. 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 // Физика Земли. 2009. № 11. С. 86–95.
- Рассказов И.Ю., Аникин П.А., Искра А.Ю., Саксин Б.Г., Миронников В.И. Результаты геоакустических исследований ударопрочности на месторождении «Антей» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. Вып. 4. С. 41–49.
- Хаммер Й., Белау Й., Шлютер Д., Петров В.А., Полуэктов В.В. Трехмерные геологические модели как основа для решения сложных структурно-геологических задач (программа openGEO) // Сергеевские чтения. Вып. 11. М.: ГЕОС, 2009. С. 145–149.
- 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.

- Hudson J.A. Rock mechanics principles in engineering practice. London, 1989. 72 p.
- 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. N 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 // 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: JNCDI 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.

# СОДЕРЖАНИЕ

<i>Ю.Г. Гатинский, Д.В. Рундквист, Г.Л. Владова, Т.В. Прохорова</i> СЕЙСМО-ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ГЛАВНЕЙШИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ РОССИИ И БЛИЖНЕГО ЗАРУБЕЖЬЯ . . . . .	13
<i>В.И. Осипов, Н.И. Фролова, С.П. Сущев, В.И. Ларионов</i> ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОГО И ПРИРОДНОГО РИСКА ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ И ТЕРРИТОРИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ . . . . .	28
<i>В.И. Величкин, Б.П. Власов, М.В. Шумилин</i> ОСНОВНЫЕ ПРОМЫШЛЕННО-ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ БЫВШЕГО СССР И РОССИИ . . . . .	49
<i>С.А. Дмитриев, В.И. Величкин, Б.И. Омельяненко</i> ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЖИДКИХ ОТХОДОВ НИЗКОГО И СРЕДНЕГО УРОВНЕЙ РАДИОАКТИВНОСТИ . . . . .	64
<i>В.И. Величкин, В.И. Мальковский, Н.Н. Тарасов, Ю.П. Диков</i> АНАЛИЗ УСЛОВИЙ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ В РАЙОНЕ ОЗЕРА КАРАЧАЙ (ЧЕЛЯБИНСКАЯ ОБЛАСТЬ) . . . . .	77
<i>Б.И. Омельяненко, В.И. Величкин, С.В. Юдинцев</i> ПОВЕДЕНИЕ АКТИНИДОВ В УСЛОВИЯХ ДОЛГОСРОЧНОГО ХРАНЕНИЯ И ЗАХОРОНЕНИЯ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА . . . . .	86
<i>С.В. Юдинцев, Б.И. Омельяненко</i> ГЕОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ИЗОЛЯЦИИ ТЕХНЕЦИЯ . . . . .	99
<i>И.Н. Соловов, А.К. Лисицын</i> ПОЛИЭЛЕМЕНТНЫЕ ЭКЗОГЕННЫЕ ЭПИГЕНЕТИЧЕСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ УРАНА: ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ И МЕТАЛЛЫ, ИЗВЛЕКАЕМЫЕ СЕРНОКИСЛОТНЫМ ПОДЗЕМНЫМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕМ . . . . .	109
<i>В.А. Петров, В.В. Полуэктов, Р.М. Насимов, А.А. Бурмистров, С.И. Щукин, Й. Хаммер</i> ИЗУЧЕНИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА УРАНОВОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ В ГРАНИТАХ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОЯТ . . . . .	124
<i>В.М. Котляков, Л.Н. Васильев, М.Ю. Москалевский</i> БАЛАНС МАССЫ АНТАРКТИЧЕСКОГО ЛЕДНИКОВОГО ПОКРОВА . . . . .	139

---

<i>Ю.Я. Мачерет, А.Ф. Глазовский, И.И. Лаврентьев</i> ВОДА В ПОЛИТЕРМИЧЕСКИХ И ТЕПЛЫХ ЛЕДНИКАХ . . . . .	152
<i>В.Н. Михаленко, С.С. Кутузов, О.В. Нагорнов, С.А. Тюфлин, И.И. Лаврентьев, С.А. Марченко, В.И. Окопный</i> СТРАТИГРАФИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ФИРНОВО-ЛЕДЯНОЙ ТОЛЩИ НА ЗАПАДНОМ ПЛАТО ЭЛЬБРУСА . . . . .	180
<i>Ю.П. Масуренков, А.Л. Собисевич</i> ЭЛЬБРУССКОЕ ОЛЕДЕНЕНИЕ – ИНДИКАТОР ГЕОТЕРМИЧЕСКОГО И ФЛЮИДНОГО СОСТОЯНИЯ ВУЛКАНА . . . . .	189
<i>А.Н. Хименков, Г.З. Перльштейн, Д.О. Сергеев, А.Н. Власов, В.П. Мерзляков, Ю.В. Халилова</i> ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ РИСКА ОПАСНЫХ ПРОЦЕССОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ . . . . .	205
<i>Е.В. Коротеева, Е.И. Вейсберг, Н.Б. Куюнцева, С.А. Лесина</i> ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ДИНАМИКУ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ВОСТОЧНЫХ ПРЕДГОРИЙ ЮЖНОГО УРАЛА . . . . .	213
<i>А.Ю. Кудеярова</i> ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНЫХ СОРБЦИОННЫХ БАРЬЕРОВ ПРИ ЗАФОСФАЧИВАНИИ КИСЛЫХ ПОЧВ . . . . .	223
<i>И.В. Галицкая, И.А. Позднякова, Л.С. Томс</i> МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ПРОГНОЗА И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОПРИРОДНЫМ ГЕОХИМИЧЕСКИМ РИСКОМ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ . . . . .	239
<i>Л.С. Кучмент, А.Н. Гельфан</i> СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ И ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ МАШТАБОВ И РИСКА КАТАСТРОФИЧЕСКИХ НАВОДНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА . . . . .	252
<i>В.В. Адушкин, П.П. Фирстов</i> ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛОЗИВНЫХ ПРОЦЕССОВ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ И ИХ ПРОЯВЛЕНИЕ В ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ В АТМОСФЕРЕ . . . . .	264
<i>А.Ю. Озеров</i> МЕХАНИЗМ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ФОНТАНИРОВАНИЯ БАЗАЛЬТОВЫХ ВУЛКАНОВ (ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ И ПРИРОДНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ) . . . . .	279
<i>О.В. Руденко, А.Л. Собисевич, Л.Е. Собисевич</i> О ФИЗИКЕ АКУСТИЧЕСКИХ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ И МЕДЛЕННЫХ ВОЛНАХ В ГРАНУЛИРОВАННОЙ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННОЙ СРЕДЕ . . . . .	299
<i>В.Н. Николаевский</i> ОЧАГ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ – СОБЫТИЯ И ПРЕДВЕСТИКИ УДАРА . . . . .	316
<i>Б.В. Левин, Г.В. Шевченко, В.М. Кайстренко, Т.Н. Ивельская, Т.К. Пинегина, Н.Г. Разжигаева</i> ПРОБЛЕМА ЦУНАМИ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ (ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ АСПЕКТ) . . . . .	332
<i>В.А. Семенов, И.И. Мохов, М. Латиф</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В РЕГИОНАХ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ ЗА ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ . . . . .	355

---

<i>Ю.Н. Авсюк, А.Л. Собисевич</i> ПРИЛИВНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ СИСТЕМЫ ЗЕМЛЯ – ЛУНА – СОЛНЦЕ И ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЗЕМЛИ . . . . .	373
<i>В.Ч. Хон, И.И. Мохов</i> ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА К ИЗМЕНЕНИЮ ОРБИТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ И КОНЦЕНТРАЦИИ АНТРОПОГЕННЫХ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ . . . . .	392
<i>В.М. Григорьев, Л.В. Ермакова, А.В. Мордвинов, Ю.А. Наговицын, А.Г. Тлатов, В.Г. Иванов, Е.В. Милецкий, Е.Ю. Наговицына, А.И. Хлыстова, С.А. Язев</i> ВОЗНИКНОВЕНИЕ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА СОЛНЦЕ, ИЗМЕНЕНИЯ ЕГО ГЛОБАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В 11-ЛЕТНЕМ ЦИКЛЕ И НА ДЛИТЕЛЬНОЙ ШКАЛЕ ВРЕМЕНИ . . . . .	399
<i>С.И. Сороко, В.П. Рожков, Е.Г. Сергеева, С.С. Бекшаев, С.С.Андреева, И.В.Николаев</i> ОСОБЕННОСТИ МОРФОФУНКЦИОНАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ И ГЕМОДИНАМИКИ МОЗГА У ДЕТЕЙ И ПОДРОСТКОВ В УСЛОВИЯХ ЕВРОПЕЙСКОГО И ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО СЕВЕРА . . . . .	413

Научное издание

# ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ПРИРОДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И КАТАСТРОФЫ

В 2 томах

Том 2

## ГЕОЛОГИЯ УРАНА, ГЕОЭКОЛОГИЯ, ГЛЯЦИОЛОГИЯ

*Печатается по решению Научного совета Программы  
фундаментальных исследований президиума РАН № 4*

Ответственный составитель д.ф.-м.н. Собисевич Алексей Леонидович

Технический редактор В.И. Горбенко  
Компьютерная верстка К.А. Мордвинцев  
Корректор С.Б. Суслова

Подписано в печать 05.09.11. Формат 60×90/8  
Гарнитура Таймс. Бумага мелованная. Печать офсетная  
Усл. печ. л. 54. Тираж 200 экз.

ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН  
123995 ГСП-5, Д-242, Москва, ул. Б. Грузинская, 10

Отпечатано в типографии издательства «ПРОБЕЛ 2000»  
109544 Москва, ул. Рабочая, 91