

РЕТРОСПЕКТИВА ДВУХ ДЕСЯТИЛЕТИЙ ГЕРМАНО-РОССИЙСКОГО СОТРУДНИЧЕСТВА В ОБЛАСТИ БЕЗОПАСНОГО ОБРАЩЕНИЯ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ

В. А. Петров¹, Ю. Кроне², Е. Н. Камнев³, Т. Тимайер⁴

¹ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва

²BGE TECHNOLOGY GmbH, Пайне

³АО «Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии», Москва

⁴Федеральное ведомство по геонаукам и природным ресурсам (БГР), Ганновер

Статья поступила в редакцию 2021 г.

Целью данной работы является представление краткой ретроспективы успешного двадцатилетнего сотрудничества между ведомствами и специалистами Германии и России в столь значимой, высокотехнологичной и наукоемкой области, как изоляция радиоактивных отходов. Отражены основные направления взаимодействия и его важнейшие результаты.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, обоснование долговременной безопасности, хранилища и могильники РАО, подземная исследовательская лаборатория, пункт глубинного захоронения радиоактивных отходов.

Светлой памяти доктора Йорга Хаммера

Введение

Начало творческим научно-техническим немецко-российским связям в области обращения с радиоактивными отходами (РАО) было положено в 2001 году, когда в рамках межправительственного соглашения Госкорпорация «Росатом» и Федеральное Министерство экономики и технологий (BMW) ФРГ определили направления сотрудничества между специалистами обеих стран в различных областях наук о Земле. До этого времени сотрудничество между российскими и немецкими учеными осуществлялось преимущественно по теме безопасности реакторов.

Дополнительный импульс научно-техническому сотрудничеству обеих стран в области исследований безопасности реакторов и изоляции РАО придали решения 2-го совместного координационного заседания группы экспертов в Берлине 10–11 июня 2003 г., в которых было предусмотрено продолжение начатых в 2001 г. совместных работ по нескольким темам.

С тех пор ежегодно проводились совместные рабочие совещания немецких и российских специалистов, направленные на координацию общих усилий по вопросам безопасности при долговременной изоляции РАО и оптимизации

концептуальных решений по захоронению высокоактивных отходов (ВАО). Основными участниками коллективных работ с немецкой стороны выступали BGE TECHNOLOGY (BGETec) GmbH (ранее DBE TECHNOLOGY GmbH) и Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, а также университеты и институты во Франкфурте-на-Майне и Карлсруэ, чуть позднее к работам присоединилось Федеральное ведомство по геонаукам и природным ресурсам (BGR, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe).

Краткий обзор результатов совместных работ

В соответствии с приоритетами, выдвинутыми Минатомом, на первых этапах работ внимание было сосредоточено на рассмотрении возможности безопасной окончательной изоляции РАО в вечномерзлых породах на архипелаге Новая Земля. Консорциум европейских экспертов, возглавляемый DBE TECHNOLOGY GmbH, в тесном сотрудничестве с АО «ВНИПИпромтехнологии» подтвердил принципиальную реализуемость такой оригинальной концепции для короткоживущих РАО [1]. Затем спектр исследований распространился на окончательную изоляцию ВАО в глубоких кристаллических породах, в частности на территории ПО «Маяк» (Челябинская область), в окрестности территории Горно-химического комбината (ГХК, Красноярский край), и позднее — на изучение глинистых формаций в Ленинградской области (Сосновый Бор).

Наиболее пристальное внимание в совместных работах уделялось вопросам обоснования долговременной безопасности хранилищ и могильников РАО. В этом контексте особая роль была отведена проекту создания в районе ГХК подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) с дальнейшим возможным переводом ее в статус пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) на участке «Енисейский» Нижнеканского гранитоидного массива.

Сотрудники АО «ВНИПИпромтехнологии», работавшие в течение пятнадцати лет по специальному договору с DBE TECHNOLOGY GmbH, регулярно предоставляли немецкой стороне исходные данные по вещественному составу гранитоидов Нижнеканского массива, сорбционным свойствам пород участка «Енисейский», миграции подземных вод, напряженно-деформированному состоянию массива (совместно с Геофизическим центром РАН), для оценки долговременной безопасности при захоронении РАО [2].

Немецкие сотрудники DBE TECHNOLOGY GmbH, GRS и BGR обрабатывали эти данные с

помощью специальных программ на своих вычислительных мощностях. Находясь в постоянном контакте с российской стороной, они на регулярных двусторонних встречах обсуждали полученные результаты и намечали направления дальнейших исследований.

На последних этапах указанного выше договора обсуждалась транспортная схема подвоза и спуска контейнеров с РАО в шахтный ствол, а также оборудование специальными стендами будущей ПИЛ [3].

Результаты этих совместных работ нашли отражение в целом ряде отчетов (проектов), выполненных немецкой стороной.

На основании российских исходных данных в ФРГ реализовывались проекты, которым присваивались определенные наименования: ASTER (2001—2005 гг.) [4], WIBASTA (2005—2008 гг.) [5], URSEL (2009—2015 гг.) [6], SUSE (2016—2019 гг.), SUSE PLUS (2020—2023 гг.). Результатом каждого из перечисленных проектов являлся одноименный отчет по проведенным научно-исследовательским работам.

Например, в проекте ASTER («Требования к разведке места для захоронения ВАО в скальной горной породе») рассматривались результаты, достигнутые по следующим двум проектам, основанным на данных, ранее полученных российскими специалистами в процессе изучения потенциальных мест захоронения радиоактивных материалов:

В2 — Исследования по окончательному захоронению высокорadioактивных отходов в глубоких гранитных формациях (район Горно-химического комбината, г. Железногорск, Красноярский край);

В3 — Исследования по окончательному захоронению высокорadioактивных и теплоделяющих остеклованных отходов в глубоких порфириновых формациях (район Производственного объединения «Маяк», г. Озерск, Челябинская область).

Целевая установка проекта ASTER состояла в том, чтобы на примере территорий ГХК и ПО «Маяк» разработать методические рекомендации для создания обоснованной программы разведки и выбора подходящего места для захоронения РАО в России, направленной на обеспечение важнейших аспектов долговременной безопасности их окончательной изоляции. Особенность данной постановки задачи определялась тем, что уже на ранней стадии разведки места и планирования захоронения формулируется вопрос о необходимости фактической геологической научной информации для оценки безопасности, которую должно обеспечить

дальнейшее исследование площадки. Таким образом, в отличие от обычной практики, предполагалось проведение более обширных и вместе с тем дорогостоящих работ по всесторонней характеристике потенциальных мест захоронения. С российской стороны головной организацией выступало АО «ВНИИПромтехнологии», которое привлекло к работе специалистов из ФГБУН ИГЕМ РАН, Радиевого института им. В. Г. Хлопина, АО «СППИ ВНИПИЭТ», КНИИГиМС, ФГУП «ПО «Маяк», ФГУП «ГХК», ФГБУН ГЦ РАН [7]. С немецкой стороны работы координировались BGR с привлечением специалистов DBE TECHNOLOGY GmbH, GRS и Технологического института Карлсруэ (KIT, ранее Исследовательский центр Карлсруэ). Так, для участка «Каменный» в районе ГХК, на основе представленных геолого-геоморфологических и геолого-геофизических данных, в BGR с помощью программы openGEO была разработана одна из первых геологических 3D-моделей потенциального места размещения могильника (рис. 1).

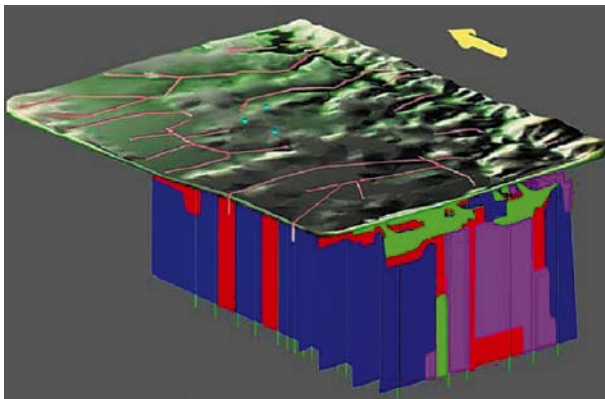


Рис. 1. Модель проницаемости пород на участке «Каменный» Нижнеканского гранитного массива. Показаны рельеф поверхности и цветом выделены блоки с высокой (зеленый и фиолетовый) и низкой (красный и синий) проницаемостью. Стрелка указывает на север

С целью расширения знаний о перспективах окончательного захоронения ВАО в гранитах в 2005 г. делегация специалистов БГР в составе докторов Отто Борнемана, Йорга Хаммера и Михаэля Айнхорна посетила площадку ПАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение» (ПАО «ППГХО») в Восточном Забайкалье (г. Краснокаменск). По согласованию с руководством Комбината в качестве объектов для изучения были выбраны глубокие горизонты месторождения Антей, локализованного в гранитах фундамента рудовмещающей Стрельцовской кальдеры, и месторождение Тулукуевское в вулканогенных породах. На обоих

объектах специалистами ИГЕМ РАН проводилось многолетнее изучение процессов миграции, накопления и перераспределения урана в окислительных (карьер Тулукуевский) и восстановительных (нижние горизонты месторождения Антей) условиях в рамках изучения урановых месторождений как природных аналогов объектов изоляции РАО [8, 9]. Наряду с этим глубокие горизонты месторождения Антей были выбраны в связи с интенсивным проявлением горных ударов, влияющих на сохранность подземной инфраструктуры.

Результаты структурно-геологического, петрографо-минералогического и структурно-петрофизического картирования легли в основу трехмерной геологической модели нижней части месторождения (рис. 2). Она объединяет инфраструктуру горных выработок, плоскости основных разломов и блоки метасоматитов, которые отличаются по составу, свойствам и структурному контролю.

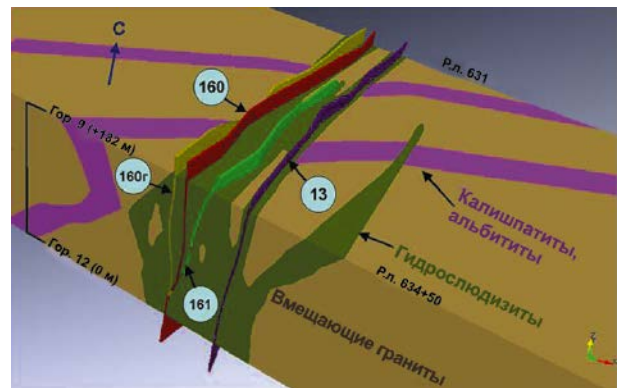


Рис. 2. Упрощенная трехмерная модель нижней части месторождения Антей, созданная с помощью пакета программ openGEO. Связанные с элементами прототектоники жильобразные тела палеозойских калишлатитов и альбититов секутся разломами 13, 160, 161 и 160 г, которые контролируют ореолы мезозойских гидротермалитов, рудные тела, рудосопровождающие и пострудные изменения. Стрелка указывает на север

При формировании модели использовались оцифрованные погоризонтные планы и разрезы масштаба 1:500, предоставленные геолого-маркшейдерской службой ПАО «ППГХО». Для моделирования применялся пакет программ openGeo, в котором обработка всего набора данных проводилась с помощью метода создания линейного каркаса, соединяющего точечные данные между собой, и последующей триангуляции внутри этого каркаса. Модель построена в реальной системе координат, и расстояния в ней соответствуют истинным. Использование программы openGeo в дальнейшем позволило:

1) определять точное положение и объемы геологических тел и структур в любом (вертикальном или горизонтальном) сечении;

2) осуществлять привязку эпицентров проявления горного давления (удары, вывалы, шелушение пород);

3) корректировать и дополнять созданное «ядро» модели любой вновь поступающей информацией (геологической, геофизической, маркшейдерской, минералогической, петрофизической, геомеханической и т. д.).

Следует отметить, что построенная трехмерная модель также в значительной степени способствовала формированию новых представлений о характере структурного контроля оруденения на месторождении [10].

Крайне важные результаты были получены по условиям миграции и концентрирования урана (радионуклидов) в зоне аэрации месторождения Тулукуевское, включая установление факторов, влияющих на динамику продвижения современного фронта окисления, важнейшим из которых является наличие внутриразломных физико-химических реакционных барьеров. Они эффективно задерживают U(VI) и переводят его в нерастворимую U(IV) форму в связи с реакционной способностью Fe-Mn-оксигидроксидов, импрегнированного углеродистого вещества и продуктов жизнедеятельности микроорганизмов — ферригидритов [11].

Тематика проекта «Исследования эффективности системы геологических и геотехнических барьеров при выборе месторасположения в магматических породах (WIBASTA)» включала исследование геологического барьера на участке «Енисейский» Нижнеканского гранитного массива в районе ГХК с целью изучения его строения и задерживающих свойств, определения перечня недостающих данных и установления неопределенностей в прогнозах, а также выработки рекомендаций для дальнейших изысканий. В проекте были решены следующие основные задачи:

- выявить особенности геологического строения и провести структурно-тектоническое районирование участка с целью выделения в его пределах слабонарушенных блоков кристаллических пород, благоприятных для подземной изоляции РАО;
- изучить состав и неоднородности внутреннего строения геологического барьера;
- оценить барьерные свойства вмещающих пород для доказательства долговременной безопасности подземной изоляции РАО.

В результате работы по проекту были сделаны следующие основные выводы:

- недостаточно данных по геологическому строению и петрографическому составу толщи метаморфических пород, особенно на больших глубинах, а также по сети разломов, что влияет на концепцию строительства могильника;
- недостаточно данных по геомеханическим и теплофизическим свойствам пород, хотя ИГЕМ РАН и DBE TECHNOLOGY GmbH предоставили дополнительные новые материалы;
- недостаточно данных по гидрогеологии возможной площадки для сооружения могильника;
- недостаточно данных по сорбционным свойствам пород, в частности по обладающим низкой теплопроводностью спессартитам, развитым, например, на Верхне-Итатском участке;
- слабо разработаны вопросы по составлению долговременных геологических прогнозов, включая эрозионные, тектонические и сейсмические процессы, возможное оледенение и др.

Было предложено учитывать немецкий опыт проведения геологоразведочных работ по выбору мест для изоляции РАО и ОЯТ:

- объект такого национального значения требует открытости (население должно иметь доступ к итогам исследований);
- эксперты будут проверять результаты и выводы (поэтому должна быть создана система обеспечения высокого качества работ, а также необходимо обеспечить хранение керна до конца процесса лицензирования могильника);
- строгое соблюдение применяемых стандартов и норм выполнения работ, в том числе при пробоотборе кернового материала, определении химического состава подземных вод, проведение геохимических анализов и т. д.

Реализация проекта URSEL была нацелена на исследование устойчивости безопасности системы захоронения ВАО в скальных формациях, размещенных в кристаллических породах (Гримзель, Аспе, ОНКАЛО), на основе комплексного анализа результатов экспериментов в ПИЛ. Особое внимание уделялось моделированию движения подземных вод и транспорта радионуклидов на основе геолого-гидрогеологических данных российских партнерских организаций. В рамках проекта специалисты GRS, BGR и Санкт-Петербургского отделения ИГЭ РАН (рабочая группа В. Г. Румынина) провели для участка «Енисейский» оценку основных характеристик геологического барьера потенциального хранилища. Для двухмерной вертикальной модели трещиновато-пористой среды исследуемого участка использовались коды d3f и r3t; для оценки адвективного переноса радионуклида через трещиноватую среду с диффузией в матрицу пород в одномерной реализации

использовался код ReproTEND. Также была проведена оценка динамики сорбционных процессов в трещинах с различным минеральным наполнением и разработана предварительная концепция закрытия планируемого могильника ВАО на участке «Енисейский».

Параллельно с работами в гранитоидных породах были проведены исследования в глинистых вмещающих породах в рамках исследовательского проекта «Аналитические исследования безопасности хранилища радиоактивных отходов в диагенетически модифицированной глинистой формации в постэксплуатационный период (SAnToS)» [12]. Проект основывался на реальных результатах геологоразведочных работ в толще Котлинских глин в Ленинградской области (Сосновый Бор), предоставленных Санкт-Петербургским отделением ИГЭ РАН, и был дополнен немецкими ноу-хау по глинистым формациям, полученным, в частности, в подземных лабораториях Мель (Бельгия), Монт-Терри (Швейцария) и Мюз-Верхняя Марна (Франция).

Дальнейшая техническая поддержка российских работ и научно-техническое сотрудничество в области окончательного захоронения ВАО осуществлялись в рамках исследовательского проекта «Аналитические исследования безопасности систем окончательного захоронения в кристаллических породах (SUSE)». При этом был проведен детальный анализ устойчивости инженерных барьеров, обобщены методы классификации пригодности кристаллических пород на основе опыта реализованных проектов по хранилищам РАО. Показано, что для подробной геоструктурно-гидрогеологической модели участка окончательной изоляции ВАО очень важны сведения о параметрах гидравлически активных трещинных систем. Для совершенствования базы данных были собраны дополнительные экспериментальные материалы по составу и свойствам вмещающих пород. Повышение уровня детализации геоструктурной модели создает основу для реалистичного моделирования потока подземных вод и распространения радионуклидов. Продолжением проекта SUSE является проект SUSE PLUS, в котором темы из SUSE прорабатываются более детально.

В пятистороннем соглашении, подписанном двумя российскими (ФГУП «НО РАО» и ИБРАЭ РАН) и тремя немецкими (BGE TECHNOLOGY GmbH, GRS и BGR) организациями 5 сентября 2019 года в рамках 10-го совместного координационного совещания, были определены направления, являющиеся в основном темами проекта SUSE PLUS, по которым продолжается совместная работа:

- характеристика разломно-трещинных систем;
- совершенствование трехмерной геоструктурно-гидрогеологической модели массива пород с визуализацией основных разрывных нарушений;
- сбор дополнительных (к уже имеющимся [13]) данных по составу и свойствам пород;
- создание региональных 3D фильтрационно-транспортных моделей;
- освоение методов планирования научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) в подземной лаборатории.

Заключение

За прошедшее с 2001 года время проведен широкий спектр совместных исследований по многочисленным направлениям в разных областях знаний для обоснования долговременной безопасности хранилищ и могильников РАО, размещаемых в различных геологических обстановках. Все наработанные подходы и полученные результаты обсуждались на многочисленных рабочих встречах и научно-методических семинарах. С российской стороны в заседаниях принимали участие специалисты следующих организаций: ГК «Росатом», ФГУП «НО РАО», НТЦ ЯРБ, АО «ВНИПИПромтехнологии», АО «СППИ ВНИПИЭТ», ФЯО ФГУП «ГХК», АО «СХК», ФГУП «ПО «Маяк», ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», АО «ГНЦ НИИАР», АО «НИКИЭТ», НИЦ «Курчатовский институт», Радиевый институт им. В. Г. Хлопина, ОАО «Атомэнергопроект», ФГБУ Гидроспецгеология, ФГБУН ИБРАЭ РАН, ФГБУН ИГЕМ РАН, ФГБУН ИГЭ РАН, ФГБУН ГЦ РАН, ФГБУН ИФХЭ РАН, НИЯУ МИФИ, ФГБОУ ВО МГУ, ФГАОУ ВО НИ ТПУ и др. По самым скромным подсчетам, было опубликовано более 70 совместных научных работ (статей в журналах, тезисов докладов в сборниках конференций, глав в монографиях и др.) [14].

Также неоднократно проводились рабочие визиты российских специалистов на объекты обращения с радиоактивными отходами в ФРГ, например: Горлебен, Ассе, Морслебен и Конрад.

Опыт прошедших десятилетий убедительно свидетельствует о необходимости продолжения и развития научно-технического сотрудничества между российскими и немецкими специалистами по решению общих для наших стран проблем в области обращения с радиоактивными отходами.

Литература

1. Lindberg C., Krone J., Christensen G., Engelhardt H. J., Filbert W., Munz A., Skagius K., Torstenfelt B.,

Ziegenhagen J. Second Phase of the Assessment of the Repository at Novaya Zemlya. Final Report / DBE TECHNOLOGY GmbH, December, 2003.

2. Андерсон Е. Б., Белов С. В., Камнев Е. Н. и др. Подземная изоляция радиоактивных отходов / Под ред. В. Н. Морозова. — М.: Горная книга, 2011. 592 с.

3. Kamnev E. N., Morozov V. N., Tatarinov V. N., Kaftan V. I. Geodynamic aspects of investigations in underground research laboratory (Nizhněkansk Massif) // Eurasian Mining. 2018. No. 2. Pp. 11–14.

4. Wallner M., Mrugalla S., Hammer J., Brewitz W., Fahrenholz Ch., Fein E., Filbert W., Haverkamp B., Jobmann M., Krone J., Lerch Ch., Ward P., Weiß E., Ziegenhagen J., Gupalo T., Kamnev E., Kononov V., Lopatin V., Milovidov V., Prokopova O. Anforderungen an die Standorterkundung für Haw-Endlager im Hartgestein (ASTER). Abschlussbericht / Peine, DBE TECHNOLOGY GmbH, 2005.

5. Jobmann M., Brewitz W., Fahrenholz Ch., Fein E., Hammer J., Keesmann S., Krone J., Mrugalla S., Wolf J., Ziegenhagen J. Untersuchungen zur Wirksamkeit des geologischen und geotechnischen Barrierensystems im Hinblick auf die Standortauswahl in magmatischen Gesteinen (WIBASTA) / Peine, DBE TECHNOLOGY GmbH, 2008.

6. Jobmann M., Flügge J., Hammer J., Herold P., Krone J., Kühnlenz T., Li H., Lommerzheim A., Meleshyn A., Wolf J. Site-specific evaluation of safety issues for high-level waste disposal in crystalline rocks. Final Report / Peine, DBE TECHNOLOGY GmbH, 2015.

7. Tatarinov V., Kaftan V., Morozov V., Kamnev E., Tatarinova T. Reduction of the geodynamic risk in the disposal of radioactive waste in geological formations // 18 International multidisciplinary conference, SGEM 2018. Section Nuclear Technologies. Vienna, 2018. Vol. 18. Issue 4.3. Pp. 11–21.

8. Лаверов Н. П., Петров В. А., Полуэктов В. В., Насимов Р. М., Хаммер Й., Бурмистров А. А., Шукин С. И. Урановое месторождение Антей — природный аналог хранилища ОЯТ и подземная

геодинамическая лаборатория в гранитах // Геология рудных месторождений. 2008. Том 50. № 5. С. 387–413.

9. Petrov V. A., Poluektov V. V., Hammer J., Schukin S. I. Uranium mineralization in fractured welded tuffs of the Krasnokamensk Area: transfer from ancient to modern oxidizing conditions / In: The New Uranium Mining Boom: Challenge and lessons learned. B. J. Merkel, M. Schipek (edit.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. Pp. 701–710.

10. Петров В. А., Ребецкий Ю. Л., Полуэктов В. В., Бурмистров А. А. Тектонофизика гидротермального рудообразования: пример молибден-уранового месторождения Антей, Забайкалье // Геология рудных месторождений. 2015. Том 57. № 4. С. 327–350.

11. Petrov V. A., Poluektov V. V., Hammer J., Schukin S. I. Fault-related barriers for uranium transport. In: Uranium Mining and Hydrogeology. B. J. Merkel, A. Hasche-Berger (edit.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. Pp. 779–789.

12. Jobmann M., Flügge J., Gazul R., Hammer J., Herold P., Krone J., Kuate Simo E., Kühnlenz T., Laggiard E., Lommerzheim A., Meleshyn A., Müller C., Rübél A., Wolf J., Zhao H. Investigation on long-term safety aspects of a radioactive waste repository in a diagenetic clay formation / Final Report, Peine, DBE TECHNOLOGY GmbH, 2017.

13. Петров В. А., Полуэктов В. В., Хаммер Й. П., Чулауф Г. Исследование минеральных и деформационных преобразований горных пород Нижнеканского массива в целях определения их удерживающей способности при геологическом захоронении и изоляции радиоактивных отходов // Горный журнал. 2015. № 10. С. 67–74.

14. Камнев Е. Н., Карамушка В. П., Селезнев А. В., Морозов В. Н., Хиллер А. Экологические проблемы и их решение при закрытии урановых производств (на примере России, СНГ и Германии) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 5. С. 26–39.

Информация об авторах

Петров Владислав Александрович, член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, профессор, директор, ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: vlad243@igem.ru.

Кроне Юрген, кандидат технических наук, старший консультант, BGE TECHNOLOGY GmbH (Д-3224, Пайне, Эшенштрассе, д. 55), e-mail: krone.radeberg@freenet.de.

Камнев Евгений Николаевич, член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ученый секретарь, АО «Ведущий проектно-исследовательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии» (115409, Москва, Каширское шоссе, д. 33), e-mail: Kamnev.E.N@vnipt.ru.

Тимайер Татьяна, научный сотрудник, куратор Минэкономики ФРГ российско-немецкого сотрудничества по захоронению РАО, Федеральное ведомство по геонаукам и природным ресурсам (БГР) (30655, Ганновер, Стиллевег, д. 2), e-mail: tatjana.thiemeyer@t-online.de.

Библиографическое описание статьи

Петров В. А., Кроне Ю., Камнев Е. Н., Тимайер Т. Ретроспектива двух десятилетий германо-российского сотрудничества в области безопасного обращения с радиоактивными отходами // Радиоактивные отходы. 2021. № 3 (16). С. XX–XX. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-XX-XX.

TWO-DECADE RETROSPECTIVE OF GERMAN-RUSSIAN COOPERATION IN THE FIELD OF SAFE RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT

Petrov V. A.¹, Krone Jü.², Kamnev E. N.³, Timayer T.⁴

¹Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine, Germany

³JSC Leading Design and Survey and Research Institute of Industrial Technology, Moscow, Russia

⁴Federal Office for Geosciences and Natural Resources (BGR), Hannover, Germany

Article received on _____, 2021

Dedicated to the blessed memory of Dr. Jorg Hammer

This paper briefly overviews a two-decade retrospective of a fruitful cooperation between German and Russian departments and experts in such a sensitive, high-tech and science-intensive area as radioactive waste disposal. The paper indicates the key areas of this cooperation, as well as the most important results achieved.

Keywords: *radioactive waste, long-term safety demonstration, radioactive waste storage facilities and repositories, underground research laboratory, deep disposal facility for radioactive waste.*

References

1. Lindberg C., Krone J., Christensen G., Engelhardt H. J., Filbert W., Munz A., Skagius K., Torstenfelt B., Ziegenhagen J. *Second Phase of the Assessment of the Repository at Novaya Zemlya*. Final Report. DBE TECHNOLOGY GmbH, December, 2003.
2. Anderson E. B., Belov S. V., Kamnev E. N. et al. *Podzemnaya izolyatsiya radioaktivnykh otkhodov* [Underground Isolation of Radioactive Waste]. Edited by V. N. Morozov. Moscow, "Gornaya kniga" Publ., 2011. 592 p.
3. Kamnev E. N., Morozov V. N., Tatarinov V. N., Kaftan V. I. Geodynamic aspects of investigations in underground research laboratory (Nizhnekansk Massif). *Eurasian Mining*, 2018, no. 2, pp. 11–14.
4. Wallner M., Mrugalla S., Hammer J., Brewitz W., Fahrenholz Ch., Fein E., Filbert W., Haverkamp B., Jobmann M., Krone J., Lerch Ch., Ward P., Weiß E., Ziegenhagen J., Gupalo T., Kamnev E., Konovalov V., Lopatin V., Milovidov V., Prokopova O. *Anforderungen an die Standorterkundung für Haw-Endlager im Hartgestein (ASTER)*. Abschlussbericht. Peine, DBE TECHNOLOGY GmbH, 2005.
5. Jobmann M., Brewitz W., Fahrenholz Ch., Fein E., Hammer J., Keesmann S., Krone J., Mrugalla S., Wolf J., Ziegenhagen J. *Untersuchungen zur Wirksamkeit des geologischen und geotechnischen Barrierensystems im Hinblick auf die Standortauswahl in magmatischen Gesteinen (WIBASTA)*. Peine, DBE TECHNOLOGY GmbH, 2008.
6. Jobmann M., Flügge J., Hammer J., Herold P., Krone J., Kühnlenz T., Li H., Lommerzheim A., Melleschyn A., Wolf J. *Site-specific evaluation of safety issues for high-level waste disposal in crystalline rocks*. Final Report. Peine, DBE TECHNOLOGY GmbH, 2015.

7. Tatarinov V., Kaftan V., Morozov V., Kamnev E., Tatarinova T. Reduction of the geodynamic risk in the disposal of radioactive waste in geological formations. *18 International multidisciplinary conference, SGEM 2018. Section Nuclear Technologies, Vienna*, 2018. Vol. 18, issue 4.3, pp.11–21.
8. Laverov N. P., Petrov V. A., Poluektov V. V., Nasimov R. M., Hammer J., Burmistrov A. A., Shchukin S. I. Uranovoye mestorozhdeniye Antey – prirodnyy analog khranilishcha OYAT i podzemnaya geodinamicheskaya laboratoriya v granitakh [The Antey uranium deposit as a natural analogue of an SNF Repository and an underground geodynamic laboratory in granites]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy – Geology of Ore Deposits*, 2008, vol. 50, no. 5, pp. 387–413.
9. Petrov V. A., Poluektov V. V., Hammer J., Schukin S. I. Uranium mineralization in fractured welded tuffs of the Krasnokamensk Area: transfer from ancient to modern oxidizing conditions. In: *The New Uranium Mining Boom: Challenge and lessons learned*. B. J. Merkel, M. Schipek (edit.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. Pp. 701–710.
10. Petrov V. A., Rebetsky Yu. L., Poluektov V. V., Burmistrov A. A. Tektonofizika gidrotermal'nogo rudobrazovaniya: primer molibden-uranovogo mestorozhdeniya Antey, Zabaykal'ye [Tectonophysics of Hydrothermal Ore Formation: an Example of the Antey Mo–U Deposit, Transbaikalia]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy – Geology of Ore Deposits*, 2015, vol. 57, no. 4, pp. 327–350.
11. Petrov V. A., Poluektov V. V., Hammer J., Schukin S. I. Fault-related barriers for uranium transport. In: *Uranium Mining and Hydrogeology*. B. J. Merkel, A. Hasche-Berger (edit.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. Pp. 779–789.
12. Jobmann M., Flügge J., Gazul R., Hammer J., Herold P., Krone J., Kuate Simo E., Kühnlenz T., Laggiard E., Lommerzheim A., Meleshyn A., Müller C., Rübél A., Wolf J., Zhao H. *Investigation on long-term safety aspects of a radioactive waste repository in a diagenetic clay formation*. Final Report, Peine, DBE TECHNOLOGY GmbH, 2017.
13. Petrov V. A., Poluektov V. V., Hammer J. R., Tsulauf G. Issledovaniye mineral'nykh i deformatsionnykh preobrazovaniy gornyykh porod Nizhnekanskogo massiva v tselyakh opredeleniya ikh uderzhivayushchey sposobnosti pri geologicheskoy zakhronenii i izolyatsii radioaktivnykh otkhodov [Study of mineral and deformation rock transformations in the Nizhnekanskiy massif aimed at identifying their retention capacity during geological disposal and isolation of radioactive waste]. *Gornyy Zhurnal – Mining Journal*, 2015, no. 10, pp. 67–74.
14. Kamnev E. N., Karamushka V. P., Seleznev A. V., Morozov V. N., Hiller A. Ekologicheskkiye problemy i ikh resheniye pri zakrytii uranovykh proizvodstv (na primere Rossii, SNG i Germanii) [Ecology of Uranium Mine Closure: Problems and Solutions (In Terms Of Russia, CIS Countries and Germany)]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' – Mining information and analytical bulletin*, 2020, no. 5, pp. 26–39.

Information about the authors

Petrov Vladislav Alexandrovich, Corresponding Member of RAS, Doctor of Science, Professor, Director, Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (35, Staromonetnyi lane, Moscow, 119017, Russia), e-mail: vlad243@igem.ru.

Krone Jürgen, Ph. D., Senior consultant, BGE TECHNOLOGY GmbH (55, Eschenstrasse, Peine, D-3224, Germany), e-mail: krone.radeberg@freenet.de.

Kamnev Evgeniy Nikolaevich, RAEN Correspondent, Doctor of Geological at Mineral Sciences, Professor, Scientific Secretary, JSC Leading Design and Survey and Research Institute of Industrial Technology (33, Kashir Highway, Moscow, 115409, Russia), e-mail: Kamnev.E.N@vnipipt.ru.

Timayer Tatiana, Research Fellow, Curator of the German Ministry of Economy Russian-German cooperation on the burial of RAO, Federal Office for Geosciences and Natural Resources (BGR) (2, Stilleweg, Hannover, 30655, Germany), e-mail: tatjana.thiemeyer@t-online.de.

Bibliographic description

Petrov V. A., Krone J., Kamnev E. N., Timayer T. Two-Decade Retrospective of German-Russian Cooperation in the Field of Safe Radioactive Waste Management. *Radioactive Waste*, 2021, no. 3 (16), pp. XX–XX. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-XX-XX. (In Russian).