ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ
ФГУП «НПО “РАДИЕВЫЙ ИНСТИТУТ им. В. Г. ХЛОПИНА”»

ТРУДЫ
РАДИЕВОГО ИНСТИТУТА
им. В. Г. ХЛОПИНА

ТОМ XI

Санкт-Петербург
2006

УДК 621.039.7

В XI том вошли результаты исследований специалистов Радиевого института им. В. Г. Хлопина по одной из актуальных проблем развития ядерного топливного цикла – удалению радиоактивных отходов в геологические формации. Рассмотрены основные вопросы, определяющие соответствие выбранных горных пород с критериями безопасности подземных хранилищ.

Представлены обоснования выбора в качестве вмещающей среды для хранилища ВАО и ОЯТ гранитоидов Нижнеканского массива (Южно-Енисейский кряж).

В Ленинградской области наиболее перспективной изолирующей средой признаны докембрийские глины в субширотной полосе южного берега Финского залива.

Разработаны методы получения кристаллических матриц – аналогов природных минералов для иммобилизации долгоживущих актинидов.

“Труды Радиевого института им. В. Г. Хлопина” включены в Реферативный журнал и базы данных ВИНИТИ. Сведения о Трудах ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям “Ulrich's Periodical Directory”.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

В. Н. Романовский

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Богданов В. Г. (ответственный секретарь), Бутомо С. В. (зам. гл. редактора), Зильберман Б. Я., Каминский Ю. Л. (зам. гл. редактора), Куделин Б. К., Римский-Корсаков А. А.,Савоненков В. Г., Суглобов Д. Н., Эйсмонт В. П.

ISBN 5-902231-06-X

© ФГУП «НПО “Радиевый институт им. В. Г. Хлопина”», 2006

Предисловие

Концепция развития ядерной энергетики РФ ориентирована на замкнутый топливный цикл, в котором облученный уран подлежит переработке и повторному использованию, а накопившийся плутоний используется в смешанном МОХ-топливе.

Образующиеся при технологических процессах отходы различного состава и уровней радиоактивности кондиционируют и изолируют в соответствии с этими различиями. Естественно, что наиболее серьезные проблемы возникают при удалении высокоактивных отходов (ВАО) и отходов, содержащих долгоживущие радионуклиды и требующих локализации и вывода из биосферы на сотни тысяч лет.

К концу 70-х годов прошлого столетия было установлено, что подземная изоляция в геологические формации является основным международно приемлемым методом для большинства типов радиоактивных отходов (РАО). Исследования последних сорока лет показали, что только геологическое удаление остается научно обоснованным и технически доступным решением проблемы долгосрочной изоляции.

Расширение знаний о природных катастрофических явлениях и возможность несанкционированного вмешательства упрочили обоснование преимуществ подземного варианта размещения ВАО и облученного ядерного топлива (ОЯТ).

Безопасность подземной изоляции гарантирует система последовательных барьеров, ограничивающих и сдерживающих миграцию радионуклидов за пределы горного отвода хранилища. В наиболее распространенную систему безопасности для ВАО и ОЯТ входят:

- высокопрочные твердые матрицы ВАО или ОЯТ в металлических оболочках, чехлах, пеналах и пр.;
- толстостенные контейнеры (металл, специальные многослойные композиции);
- комплекс изоляционно-сорбционных материалов на основе природных минералов – аналог природных геохимических барьеров;
- геологическая среда – стабильные низкопроницаемые, малообводненные формации, горные породы с высокими удерживающими свойствами.

Многобарьерная система создается с запасом технических возможностей (принцип «избыточности барьеров») и сохранением барьерных функций после разрушения первичных структур (удержание радионуклидов продуктами кристаллизации стекломатриц, коррозии металлов и др.).

Для долгоживущих радионуклидов основным барьером является стабильная и предсказуемая по состоянию во времени геологическая среда, выбранная в соответствии с принципами безопасности и техническими критериями подземной изоляции.

Решение проблемы безопасного удаления РАО в геологические формации требует комплексного подхода, соединяющего как крупные научные направления радиохимической технологии, геологии, так и междисциплинарные разделы – геохимию, изотопную геохронологию, геоэкологию и др.

В Радиевом институте работы в области обращения с радиоактивными отходами переработки облученного ядерного топлива ведутся в трех направлениях:

1. Разработка и оптимизация технологической схемы переработки ОЯТ и ВАО с целью выделения требуемых фракций радионуклидов с заданной степенью чистоты.
2. Поиск и технология получения особопрочных матриц (стекло, кристаллическая керамика), оптимальных для иммобилизации отдельных фракций радионуклидов.
3. Исследования геологических формаций и горных пород, перспективных для подземной изоляции радиоактивных материалов.

Комплексные геологические исследования включают три основных типа пород, рекомендуемых для использования в качестве вмещающей среды подземных хранилищ: каменную соль, глины и гранитоиды. Изучение соляных формаций проводилось по Программе мирного использования подземных ядерных взрывов. Глины Ленинградской области предлагалось использовать для регионального хранилища РАО Северо-Западного региона.

Наиболее детально с целью обоснования возможности использования для подземной локализации твердых радиоактивных отходов завода РТ-2 Горно-химического комбината и облученного ядерного топлива исследованы гранитоиды Нижнеканского массива (Южно- Енисейский кряж).

Разрабатываемая в Радиевом институте технология разделения ВАО направлена на оптимизацию условий безопасности их хранения и удаления. Это достигается разделением смеси химически разнородных радионуклидов с различными периодами полураспада на несколько групп с близкими свойствами.

ВАО от переработки энергетических реакторов делятся на три фракции:

- фракция «цезий + стронций»;
- фракция трансплутониевых и редкоземельных элементов («ТПЭ + РЗЭ»);
- фракция продуктов деления («ПД»).

Фракции существенно различаются по остаточному энерговыделению, потенциальной радиационно-биологической опасности и, соответственно, по необходимым условиям и времени изоляции. Основные параметры отдельных фракций определяют требования к горно-инженерному комплексу и вмещающей этот комплекс геологической среде. Без дополнительных обоснований изначально просматриваются варианты остекловывания цезий-стронциевой фракции с обеспечением безопасного хранения в течение 300 лет. Высокое остаточное энерговыделение требует повышенной теплопроводности сорбционно-изолирующих барьеров и отсутствия серьезных негативных изменений вмещающих пород в ближних приконтурных зонах горных выработок. Статус участка подземной изоляции фракции «цезий + стронций» определяется как «хранилище с надзором и возможностью вмешательства в систему инженерных барьеров и радиационным геоэкологическим мониторингом». При условии выбора кондиционной площадки и стабильности состояния горного отвода безопасность хранилища обеспечивает мультибарьерная система защиты. Предполагается, что современные инженерно-технические барьеры могут просуществовать не менее 10 тыс. лет.

Несмотря на реальность выполнения условий изоляции этой фракции, существуют неопределенности, связанные с присутствием вместе с цезием-137, период полураспада которого 30 лет, цезия-135 с периодом полураспада $2{,}3 \cdot 10^6$ лет.

Необходимость весьма продолжительной подземной изоляции в еще более жесткой форме требуется для фракции «ТПЭ + РЗЭ», в которой присутствуют долгоживущие радиоизотопы нептуния, плутония, америция.

Кроме того, на ГХК удалению в хранилища глубокого заложения подлежат:

- накопленные высокоактивные пульпы после их кондиционирования в стеклоподобные матрицы;
- ОЯТ, не подлежащее переработке.

Очевидно, что для нужд ГХК необходимо сооружение крупного подземного комплекса с различными условиями подземной изоляции:

- хранилища отвержденных, остеклованных отходов и ОЯТ, не подлежащих переработке, в котором безопасность обеспечивается в основном системой инженерных барьеров;
- кондиционного блока горных пород, в котором изоляция долгоживущих радионуклидов обеспечивается природными геохимическими барьерами.

В едином подземном сооружении два основных типа хранилищ, как правило, разделяются по глубине. В разломно-блоковых структурах гранитоидных массивов разделение может быть по соседним блокам.

До настоящего времени основным препятствием в подземной изоляции является проблема научного обоснования её безопасности на сотни тысяч лет, фактически – это захоронение долгоживущих радионуклидов в геологические формации. Возникают неопределенности в самой концепции подземной изоляции для таких понятий, как «размещение» (disposition) и «удаление» (disposal). Ревизия и переосмысление проблемы удаления ВАО и ОЯТ ставят под сомнение саму возможность доказательства безопасности, в общепринятом понимании этого слова, на весьма длительные сроки, поскольку проявление ряда внешних воздействий носит вероятностный характер.

В настоящее время на пути решения проблемы долгосрочного удаления (захоронения) определились два научных направления:

- синтез и изучение оптимальных кристаллических материалов для иммобилизации долгоживущих радионуклидов;
- научное обоснование долговременного прогноза условий изоляции в геологических формациях.

Первое направление базируется на одном из положений геологической концепции об использовании природных аналогов. В данном случае в роли аналогов представлены природные радиоактивные минералы, сохраняющие полностью все элементы радиоактивных рядов урана и тория в течение миллиардов лет. Это, главным образом, акцессорные или примесные минералы (циркон, монацит, гранат, пирохлор и др.), но не исключена возможность допирования радионуклидами породообразующих минералов. Безопасность захоронения обеспечивают устойчивые кристаллические матрицы и соблюдение концепции Шхаулинга, которая обосновывает захоронение опасных веществ в виде соединений, максимально приближенных к природным минералам и горным породам, показавшим свою совместимость с биосферой в течение длительного времени. В целом – это научно-технологическая задача, решаемая в настоящее время.

Более сложным представляется второй аспект проблемы – долгосрочное прогнозирование. Будущее геологической среды подземного хранилища базируется на законах формирования и развития литосферы и её составляющих структур, отдельных формаций и геологических тел. Но для оценки долгосрочной безопасности хранилища геологического (тектонического, гидрогеологического и пр.) прогноза далеко не достаточно. Необходим еще геоморфологический прогноз, который, в свою очередь, в значительной степени зависит от климата. Поэтому требуется реконструкция всей геоморфологической системы региона (климата, рельефа, гидрогеологии т. д.) с последующей экстраполяцией в будущем тенденций её развития. За последнее время исследования глобальных изменений среды и климата приобретают

исключительно важное значение. Разработаны и внедрены многочисленные методы палереконструкций с привлечением широкого спектра магнитно-геофизических, изотопных, спорово-пыльцевых и других анализов. Проведены международные комплексные исследования регионов и крупных природных объектов, таких как Антарктида, озеро Байкал и др.

Основные затруднения при составлении долгосрочного прогноза вносят случайные, вероятностные явления, которые могут негативно воздействовать на подземную изоляцию отходов. Как ни мала возможность падения на хранилище крупного метеорита, она всё же существует. С большей вероятностью можно прогнозировать природные циклические процессы, например оледенения. Однако и здесь могут вмешаться вероятностные техногенные факторы, глобальные последствия которых определяются далеко не однозначно.

К числу осложнений следует отнести само понятие «безопасность», имеющее не только научно-техническое, но и социально-психологическое значение. Исключая все далёкие от реальности заявления и радиационные спекуляции противников ядерной энергетики, необходимо признать относительность и неубедительность таких показателей безопасности, как дозы излучения и риск.

Даже предельная сложность научно-технических проблем не означает невозможности их решения. В обозримом будущем экологически более безопасной альтернативы атомной энергетике пока не существует. Решение проблемы изоляции радиоактивных отходов – насущное требование времени. Весьма существенно, что в области геологической изоляции РАО накопился опыт многолетних исследований в подземных лабораториях, подготовлены к вводу и уже эксплуатируются подземные хранилища.

В предлагаемом выпуске Трудов представлены результаты исследований специалистов Радиевого института и работ с их участием по вопросам обращения с ВАО и их изоляции, ориентированных на программу развития ГХК и завода РТ-2. Существенная часть выполненных работ проведена в рамках проектов МНТЦ №№ 255, 1063 и 1491 (1995-2004 гг.).

Приведены материалы по оценке перспектив создания подземных хранилищ РАО в нижнекембрийских глинах Ленинградской области.

Е. Б. Андерсон, доктор геолого-минералогических наук
В. Н. Романовский, доктор технических наук

Результаты поисковых и научно-исследовательских работ по выбору площадок для подземной изоляции ВАО и ОЯТ на Нижнеканском массиве гранитоидов (Южно-Енисейский кряж)

Е. Б. Андерсон, В. Г. Савоненков, Е. Ф. Любцева, С. И. Шабалев, Ю. М. Рогозин, Н. Л. Алексеев

По заданию Министерства по атомной энергии Российской Федерации в 1993 г. начались исследования по поиску геологических формаций и площадок для строительства подземного комплекса изоляции отвержденных ВАО Горно-химического комбината (ГХК, г. Железногорск), включая будущие отходы завода РТ-2 и не подлежащее переработке ОЯТ. Для проведения исследований был создан коллектив специалистов, представляющих организации Минатома, Российской академии наук, С.-Петербургский и Красноярский университеты, а также геологические организации Красноярского края. Научное руководство и координация работ были возложены на Радиевый институт.

Территория поиска первоначально охватывала краевые части трёх глобальных геологических структур: Сибирской платформы, Западно-Сибирской плиты и Алтае-Саянской орогенической зоны. Анализ комплексной информации по геологии, тектонике, сейсмоактивности, природопользованию и социально-экономическим аспектам показал, что в наибольшей степени геологической концепции и геологическим критериям соответствуют древние магматические и метаморфические формации Южно-Енисейского кряжа – краевого выступа кристаллического основания Сибирской платформы.

В пределах Южно-Енисейского кряжа были выделены перспективные площади и среди них северная часть верхнепротерозойского Нижнеканского гранитоидного массива – одного из крупнейших в Средней Сибири. Выполненные в пределах массива поисково-съемочные геолого-геофизические работы определили наибольшее соответствие с требуемыми свойствами среды изоляции двух участков – Итатского и Каменного, площадью 15-20 км^2 каждый, находящихся в 25-30 км от ГХК.

Полученные к настоящему времени данные геологических, геофизических, тектонических, гидрогеологических и других исследований подтверждают обоснованность выбора. Проведенные в Радиевом институте исследования проб, полученных при разбуривании скважин, показали, что минералого-геохимические особенности гранитоидов массива способствуют удержанию и поглощению таких радионуклидов, как цезий, плутоний, америций. По расчётам, за длительные интервалы времени радиационный ореол миграции долгоживущих актиноидов не выйдет за пределы ближней приконтурной зоны подземных выработок хранилища.

Оценки геолого-тектонического развития и анализ палеоклиматических реконструкций не выявили в ближайшие 100-130 тыс. лет вероятности развития природных коллизий, негативно влияющих на условия изоляции ВАО.

Объем имеющихся данных позволил обосновать проведение детальных предпроектных изысканий для сооружения подземной исследовательской лаборатории и дать предварительную оценку воздействия хранилища на окружающую среду.

Перспективные участки и Нижнеканский массив в целом по уровню и объему целевых исследований являются первыми и наиболее вероятными кандидатами для реализации концепции Минатома по созданию в Российской Федерации региональных хранилищ и могильников РАО. Необходимо завершить комплексные геологические исследования площадок и разведку массива, обосновывающие подземное строительство хранилища.

Введение

Наиболее безопасным вариантом длительной изоляции радиоактивных материалов от биосферы и экологических систем в настоящее время принимается технически доступный и научно обоснованный способ их размещения в подземных хранилищах глубокого заложения – более 300-500 м.

В качестве вмещающей среды выбираются геологические структуры и горные породы, отвечающие требованиям геологической концепции и критериям, направленным на оптимизацию безопасности подземной изоляции радионуклидов. Основным средством обеспечения безопасности являются системы искусственных и естественных барьеров, препятствующих выходу изолируемых радионуклидов за прогнозируемые пределы горного отвода. При изоляции долгоживущих радионуклидов со сроками потенциальной опасности более 500 лет вмещающим горным породам отводится роль основного защищающего барьера, функционирование которого считается не ограниченным во времени по сравнению с искусственной, инженерно-технологической защитой.

Для проведения поисково-аналитических геологических работ необходимы исходные данные о составах и количествах радиоактивных материалов для подземной изоляции. Требования безопасности, определяемые свойствами этих материалов, должны соответствовать изолирующим свойствам выбранной геологической среды. В конце 1992 г. в рамках Федеральной целевой программы по обращению с радиоактивными отходами (РАО) начались работы по решению проблемы отходов завода РТ-2 и Горно-химического комбината [1]. В подземном хранилище должны быть размещены фракционированные отвержденные отходы завода, дефектные облученные тепловыделяющие сборки (ОТВС), а также другие РАО ГХК. Позднее определилась вероятность поступления отходов, образующихся при изготовлении МОХ-топлива [2].

Состав отдельных фракций РАО требует весьма продолжительных по времени сроков изоляции – до миллиона лет, то есть окончательного захоронения, при котором основную барьерную функцию выполняет вмещающая геологическая среда. Для ОТВС будет создано хранилище с превалирующей защитной функцией инженерных барьеров. По начальным представлениям определилась необходимость сооружения достаточно крупного комбинированного подземного комплекса в горных породах, максимально соответствующих критериям безопасности выбора площадок. Площадь подземной части комплекса должна быть не менее 1 км^2.

По поручению Минатома был сформирован коллектив специалистов, представляющих предприятия отрасли, Российской академии наук, Министерства науки и образования, а также геологические организации Красноярского края. В дальнейшем количество участников возросло в основном за счет привлечения красноярских специализированных предприятий. Научное руководство и координация работ по поиску и выбору площадки были возложены на Радиевый институт и персонально на заместителя генерального директора, доктора геолого-минералогических наук Е. Б. Андерсона.

План работ составлялся в соответствии с опубликованными в то время рекомендациями МАГАТЭ, методическими основами поисково-разведочных работ и нормативными документами [3-8]. В соответствии со сложившейся практикой и требованиями по реализации потенциально опасных экологических объектов комплексные геологические исследования выполнялись поэтапно, причем каждое из них сужало площадь рассматриваемой территории, расширяя одновременно детализацию поисковых работ.

1. Глобальные геологические структуры

Горно-химический комбинат и строительная площадка завода РТ-2 расположены близ границы двух глобальных геологических структур – Сибирской платформы на востоке и Западно-Сибирской плиты на западе. Южнее начинается эпиплатформенная Алтае-Саянская орогеническая зона (рис. 1).

Рис. 1. Расположение глобальных геологических структур по отношению к Горно-химическому комбинату и заводу РТ-2 (г. Железногорск).

Анализ имеющейся информации по геологии, тектонике, сейсмической активности, природопользованию, социально-экономическим и демографическим аспектам показал существенное различие территорий рассматриваемых структур.

Чехол Западно-Сибирской плиты сложен молодыми осадочными породами, не являющимися оптимальной средой для подземной изоляции. Определенные ограничения ставила также потенциальная нефтегазоносность этого региона.

Алтае-Саянский ороген примыкает к Центрально-Азиатскому складчатому поясу, характеризуется повышенной сейсмичностью и высокими скоростями вертикальных тектонических движений.

На территории Сибирской платформы рассматривались солевые отложения Канско-Тасеевской впадины, образованные в результате крупной трансгрессии в начале кембрия. По имеющимся данным [9, 10], солевые формации впадины ни по составу пород, ни по мощности пластов каменной соли не удовлетворяют критериям выбора площадок для подземной изоляции РАО.

Наиболее перспективными для поисков оказались геологические формации Южно-Енисейского кряжа (Ангаро-Канский выступ), рассматриваемого в качестве краевой структуры фундамента древней Сибирской платформы, отделенной от более молодых комплексов Енисейского кряжа трансрегиональной ангарской глубинной зоной разломов.

Южно-Енисейский кряж имеет длительную, многоэтапную историю своего развития, прослеживающуюся от архейской пангеосинклинали (более 2,5 млрд. лет назад) до неотектонических блочных движений в наше время.

Тесное пространственное совмещение различных вещественных комплексов и резкие градиенты метаморфических преобразований свидетельствуют о крайне сложной геологической эволюции региона. Древние метаморфизованные структуры имеют блоково-чешуйчато-надвиговое строение с многочисленными тектоническими нарушениями. Весь кряж разбит на разновеликие блоки разломами и трещинами различной ориентации и генезиса. Тем не менее, именно среди формаций Южно-Енисейского кряжа можно было выделить перспективные участки: крупные блоки малопроницаемых магматических или метаморфических пород.

Для поисково-аналитических работ была разработана концепция перспективных структур и специальные, приемлемые для исследуемых геологических формаций, критерии выбора [11, 12]. В их основу было положено главное требование: перспективный литосферный блок должен быть сравнительно однородным при малой проницаемости и водонасыщенности.

Территория поиска составила около 22 000 км^2; по ней была собрана и проанализирована следующая информация:

- геологические, геофизические и специализированые карты различных масштабов;
- отчеты по геологической съемке, поискам полезных ископаемых, гидрогеологическим исследованиям, изучению тектоники, специальным геофизическим (аэрогеофизическим, гравиметрическим и др.) и геодезическим работам, анализу различных геологических процессов;
- аэрофотоснимки, спутниковые снимки, топокарты различных масштабов;
- научные публикации по исследуемому району.

2. Геологическое строение Южно-Енисейского кряжа

К наиболее древним породам Южно-Енисейского кряжа относят канскую серию: гнейсы, гранулиты, амфиболиты, сланцы кузеевской и атамановской толщ. Возраст субстрата пород канской серии по окцессорным цирконам составляет 2730±180 млн. лет [13]. В верхнем архее в метакомплексы канской серии происходит послойное внедрение габброидов кимбирского комплекса (табл. 1, рис. 2).

В биотитовых гнейсах атамановской толщи на правом берегу р. Енисей размещен подземный комплекс ГХК, эксплуатируемый почти 40 лет. Многолетние натурные, лабораторные и аналитические исследования дали исключительно ценную информацию о состоянии и поведении блоковых гнейсовых структур под влиянием многофакторных техногенных воздействий [14, 15].

Таблица 1

Опорные геохронологические данные для метаморфических и магматических комплексов Енисейского кряжа

Стратиграфическое подразделение, тектономагматический этап, комплексы (толщи, серии, массивы и пр.)	**Возраст, млн. лет**	**Ссылка, год**
Среднепалеозойская тектоническая активизация		
Нарушение изотопных систем цирконов в гранитогнейсах Тейского купола	356±185	[23], 1999
Верхний протерозой		
Поздневендский (позднесалаирский) этап		
Трондьемиты Верхнеканского массива	555±5	[26], 2001
Байкальская складчатость		
Риолиты предивинского террейна	637±5,7	[25], 1999
Порожнинский комплекс щелочных пород (Заангарье)	697,2±3,6	[24], 2001
Гранитизация тейского гранитогнейсового купола (Заангарье)	866±16	[23], 1999
Гранитоиды посольно-ангарского комплекса	850±60	[22], 1976
Гранитоиды Нижнеканского массива	940±90	[19], 1964
Нижний протерозой		
Гиперстеновые граниты (кузеевиты) Приангарья	1734±4	[17], 2001
Породы Таракского массива	1820±80	[16], 1993
Мигматизация пород канской серии	1840±40	[16], 1993
Гранулитовый метаморфизм канской серии	1900±20	[16], 1993
Протолит биотитовых ортогнейсов Канского зеленокаменного пояса	2227±69	[26], 2001

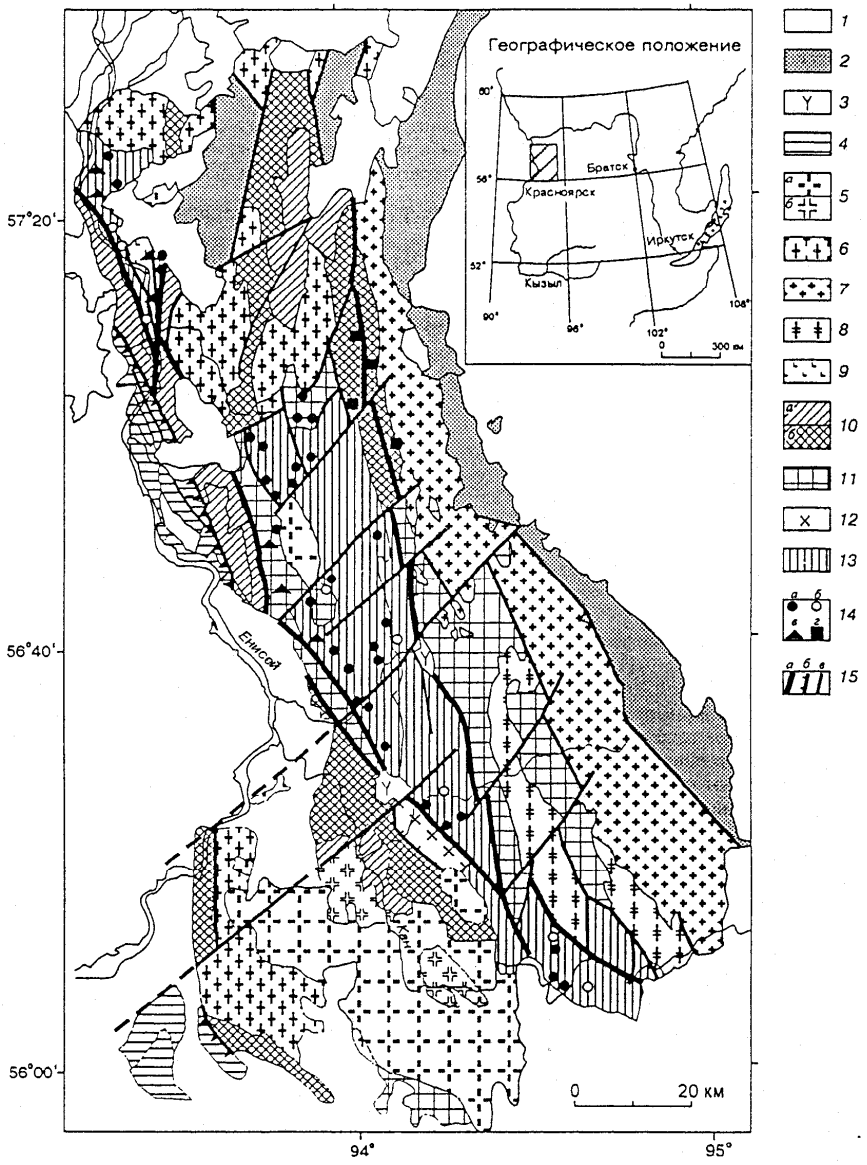


Рис. 2. Карта метаморфических и магматических формаций Южно-Енисейского кряжа. (Составлена с использованием материалов К. А. Заблоцкого, А. Д. Ножкина, Г. Г. Лепезина, В. П. Серенко, Е. К. Ковригиной и др. [34]):

1, 2 – перекрывающие отложения фанерозойского (*1*) и раннепротерозойского (*2*) возраста; *3* – порожненский комплекс сиенитов, сиенитпорфиров и щелочных гранитов (V?); *4* – юксеевский комплекс островодужно-офиолитовых образований; *5* – комплекс аллохтонных гранитоидов (граниты (*а*), гранодиориты (*б*) (PR_2?)); 6 – комплекс реоморфических гранитов (PR_2?); *7* – таракский гнейсогранитный комплекс (PR1); *8* – мигматит-гнейсовый комплекс (PR_1); *9* – кимбирский комплекс расслоенных габброноритов (PR_1?); *10* – енисейский амфиболит-гнейсовый комплекс (PR_1): двуслюдяные гнейсы с прослоями карбонатных пород и амфиболитов (*а*), кордиеритовые гнейсы (*б*); *11* – атамановский гранулит-гнейсовый комплекс (AR?); *12* – чарнокит-гнейсовый комплекс (AR?); *13* – кузеевский гранулит-метабазит-гнейсовый комплекс (AR?); *14* – места находок критических парагенезисов: гиперстен-силлиманит-кварцевых (*а*), корунд-кварцевых (*б*), эклогитоподобных пород (*в*), андалузитсодержащих гнейсов (*г*); *15* – тектонические нарушения: протяженные зоны разрывов с бластомилонитами и катаклазитами (*а*), надвиги (*б*), основные разломы (*в*).

В конце архея – начале протерозоя на стадии геосинклинального развития кряжа происходит накопление пород енисейского комплекса (исаевская и среднеканская толщи) и мигматизация канской серии – 1840±40 млн. лет [16]. В это же время происходит формирование гранитоидов таракского комплекса. Крупный Таракский массив в рассматриваемом районе приурочен к антиклинальной структуре архейских гнейсов. Его протяженность в северо-западном направлении около 120 км, ширина 6-20 км. Северо-западная граница гранитоидов проходит по крупному региональному разлому. Ориентировка массива, его внутренних структур, ксенолитов и послойных мигматитов совпадают с основной северо-западной ориентацией геолого-тектонических элементов Южно-Енисейского кряжа. По имеющимся данным Таракский массив представляет крупное пластообразное тело гранитизированных пород, мощность которых не превышает 2-х км. Завершают метаморфизм гранулитовых фаций архея магматические гиперстеновые граниты – кузеевиты с возрастом 1734±4 млн. лет [17].

На границе нижнего и верхнего протерозоя (1650 млн. лет) в пределах кряжа существовал платформенный режим с характерными трапповыми образованиями комаровского комплекса.

Верхнерифейский геосинклинальный этап сопровождался формированием гранитоидов посольнинско-ангарского комплекса, в том числе Нижнеканского массива. Последний с площадью, включая закрытую часть, около 3500 км^2 является крупнейшим в Средней Сибири. Массив согласно к вмещающим архейским породам вытянут в северо-западном направлении на расстоянии более 100 км и приурочен к сочленению архейских глыб кряжа в зоне глубинного Байкальско-Енисейского разлома. Его формирование связано с этапом субдукции крупной островной дуги (Исаковской) под формации Енисейского кряжа [18]. Гранитоиды Нижнеканского массива прорывают протерозойский метаморфический комплекс кряжа и, в свою очередь, перекрываются трансгрессивно налегающими отложениями нижнего девона Рыбинской впадины. Эти два события разделены интервалом времени в 1500 млн. лет. Для изотопно-геохронологических исследований пород массива использованы монациты и цирконы, отобранные в основном по его восточной границе, по берегам р. Кан [19]. Если использовать диаграмму Аренса – Везерилла, наиболее достоверные цифровые значения можно разделить на две возрастные группы: 1790±140 млн. лет и 940±90 млн. лет. Для слюд и полевых шпатов были получены значения 620±50 млн. лет. Имеются новые данные рубидий-стронциевого метода: 809±9 млн. лет и 803±31 млн. лет, которые авторы не считают окончательными [20].

Наиболее вероятное время формирования Нижнеканского массива и всего нижнеканского комплекса – верхний рифей (1000-650 млн. лет). Это время проявления крупнейшего события в истории развития Енисейского кряжа – интенсивного байкальского орогенеза с важнейшим рубежом формирования тектоно-магматических комплексов – 900 млн. лет.

Принимаемое время формирования гранитоидов посольно-ангарского комплекса, в который включают и гранитоиды Нижнеканского массива, – 850±60 млн. лет [21, 22].

Одновременно в северной части Енисейского кряжа происходит гранитизация тейского гранитогнейсового купола: 866±16 млн. лет [23].

В конце байкальской фазы формируются щелочные породы порожнинского комплекса: 697,2±3,6 млн. лет [24] и вулканиты предивинского террейна, к западу от Канско-Тасеевской впадины: 637±5,7 млн. лет [25].

К наиболее молодым магматическим образованиям Южно-Енисейского кряжа относятся гранитоиды (трондьемиты) Верхнеканского массива: 555±5 млн. лет [26].

Среднепалеозойская тектоническая активизация (356±185 млн. лет) отразилась нарушением изотопных систем цирконов в гнейсогранитах тейского купола [23].

Проведение изотопно-геохронологических исследований древних неоднократно метаморфизованных пород, содержащих реликтовые и «омоложенные» минералы, связано с определенными трудностями. Дополнительные осложнения возникают в связи с полихронностью формирования крупных геологических тел. Всё это требует комплексного изучения информативных минеральных ассоциаций и изотопных систем. Для гранитоидов Нижнеканского массива такие исследования находятся в начальной стадии.

После завершения активных тектоно-магматических событий верхнего рифея структуры Южно-Енисейского кряжа вступают в стадию стабильного платформенного развития. Раннепалеозойское время было этапом размыва сформировавшихся докембрийских структур, так как кембрийские, ордовикские и раннесилурийские отложения здесь отсутствуют. Вспышки эндогенной активности этого времени связаны либо с «горячими точками» (севернинская вулканоплутоническая депрессия в нижнем течении р. Немкиной), либо с отголосками коллизионных процессов столкновения Индийской и Евроазиатской литосферных плит.

Эпоха среднепалеозойской (410-380 млн. лет) тектономагматической активности, сопровождаемая растяжением литосферы и формированием рифтовых структур, охватывала как Сибирскую, так и Восточно-Европейскую платформы. Активизация могла быть связана со сложными дифференциальными движениями отдельных литосферных плит, вращения Сибирского и смещения на север Восточно-Европейского континента, формированием складчатых структур Алтае-Саянской области [27].

Режим размыва и сноса в условиях выровненного рельефа сохранялся и в конце палеозоя, в среднем и позднем карбоне, а также в ранней перми (340-280 млн. лет). В это же время Восточный Саян претерпел герцинский орогенез и оформился в горную систему.

В поздней перми – раннем триасе (250-240 млн. лет) оформляется раздел между прогибающейся частью Западно-Сибирской плиты и воздымающейся областью Сибирской платформы и Енисейского кряжа. Амплитуда смещения по крупным разломам достигает сотен метров. Осадки этого времени сохранились лишь в наиболее прогнутых частях кристаллического фундамента.

Эпохой повсеместного опускания территории и развития морских бассейнов стало юрское время (208-145 млн. лет). Рельеф был достаточно выровнен, но происходили дифференцированные движения отдельных блоков. Оформился краевой шов Сибирской платформы с опускающейся Западно-Сибирской плитой – Муратовский разлом (проходит по восточной окраине г. Железногорска и пересекает р. Енисей вблизи ГХК). К востоку от него развивается серия субмеридианальных разломов (с запада на восток): Правобережный, Большетельский, Малотельский, Большой и Малый Итатские [28]. Четыре последних разрабатываются долинами одноименных рек.

От мела до среднего палеогена (132-58 млн. лет) формируется региональная выровненная структурно-денудационная поверхность Западно-Сибирской плиты, Енисейского кряжа и Восточных Саян. Новейшие тектонические движения начались в позднем олигоцене, около 25 млн. лет назад. Верхняя возрастная граница каолинит-галлуазитовой коры выветривания датируется ранним олигоценом – 10 тыс. лет назад. С конца плиоцена (1,5 млн. лет) Южно-Енисейский кряж испытывает медленное воз-

дымание в условиях спокойного тектонического режима. Особенности формирования рельефа и гидросети региона определяются режимом циклических оледенений.

Южно-Енисейский кряж является стабильной литосферной структурой, вступившей в свою платформенную стадию развития с начала палеозоя – 570 млн. лет назад. История его формирования и расположение по отношению к Сибирской платформе дают основания для рассмотрения структур кряжа в качестве эпибайкальского щита этой древней платформы [23].

Средние параметры теплового режима Сибирской платформы, включая Енисейский кряж, сохраняются стабильными в течение последних 300-400 млн. лет [29].

Почти полное отсутствие отложений в фанерозое связано с наличием в разрезе кряжа абиссальных и мезоабиссальных зон разуплотнения, изостатически препятствующих прогибанию земной коры [30].

Тектонические подвижки позднетретичного и четвертичного времени отразились на формировании рельефа Южно-Енисейского кряжа, но не затронули его внутренние структуры, образовавшиеся в допалеозойское время. Для жестких кристаллических пород кряжа наиболее четко проявляется одно из фундаментальных свойств геологической среды – движение блочных структур на разных иерархических уровнях.

Анализ комплексной информации по изучению Южно-Енисейского кряжа, опирающийся на существующий уровень знаний наук о Земле, дает право утверждать о сохранении его тектонического режима в течение ближайших миллионов лет.

3. Нижнеканский гранитоидный массив

В пределах Южно-Енисейского кряжа по критерию условно-однородных блоков на площади около 9000 км^2 было выделено 18 перспективных для дальнейшего анализа площадей [1, 11]. В их число входили древнейшие гнейсовые толщи, породы Таракского массива, гранитоиды Белогорского и Нижнеканского массивов. Сравнительная оценка площадей проводилась по специально составленному перечню критериев, в который вошли не только геолого-структурные параметры, но и территориальное положение, особенности социальной структуры, расстояния от ГХК и пр. (рис. 3).

Более детальный анализ показал, что значительная часть выделенных площадей далеко не полностью удовлетворяет требованиям геолого-структурного и тектонического критериев (близость глубинных разломов, повышенная трещиноватость и анизотропия пород, ограниченная мощность сравнительно однородных площадей и пр.). Сопоставление результатов аналитического поиска, полученных различными методами и различными организациями (Радиевый институт, НИИ земной коры СПбГУ, ГХК, ВНИПИпромтехнологии, Геологический институт РАН) отдает предпочтение площадям, выделенным в северной части Нижнеканского массива гранитоидов, расположенного в непосредственной близости от ГХК и площадки завода РТ-2 (восточнее и юго-восточнее).

На начальных этапах поисковых работ наиболее оперативную информацию о строении массива дают специализированные геофизические исследования [11]. Через 3 года после начала работ геофизическая съемка выявила два наиболее перспективных участка Нижнеканского массива: Итатский и Каменный (рис. 4).

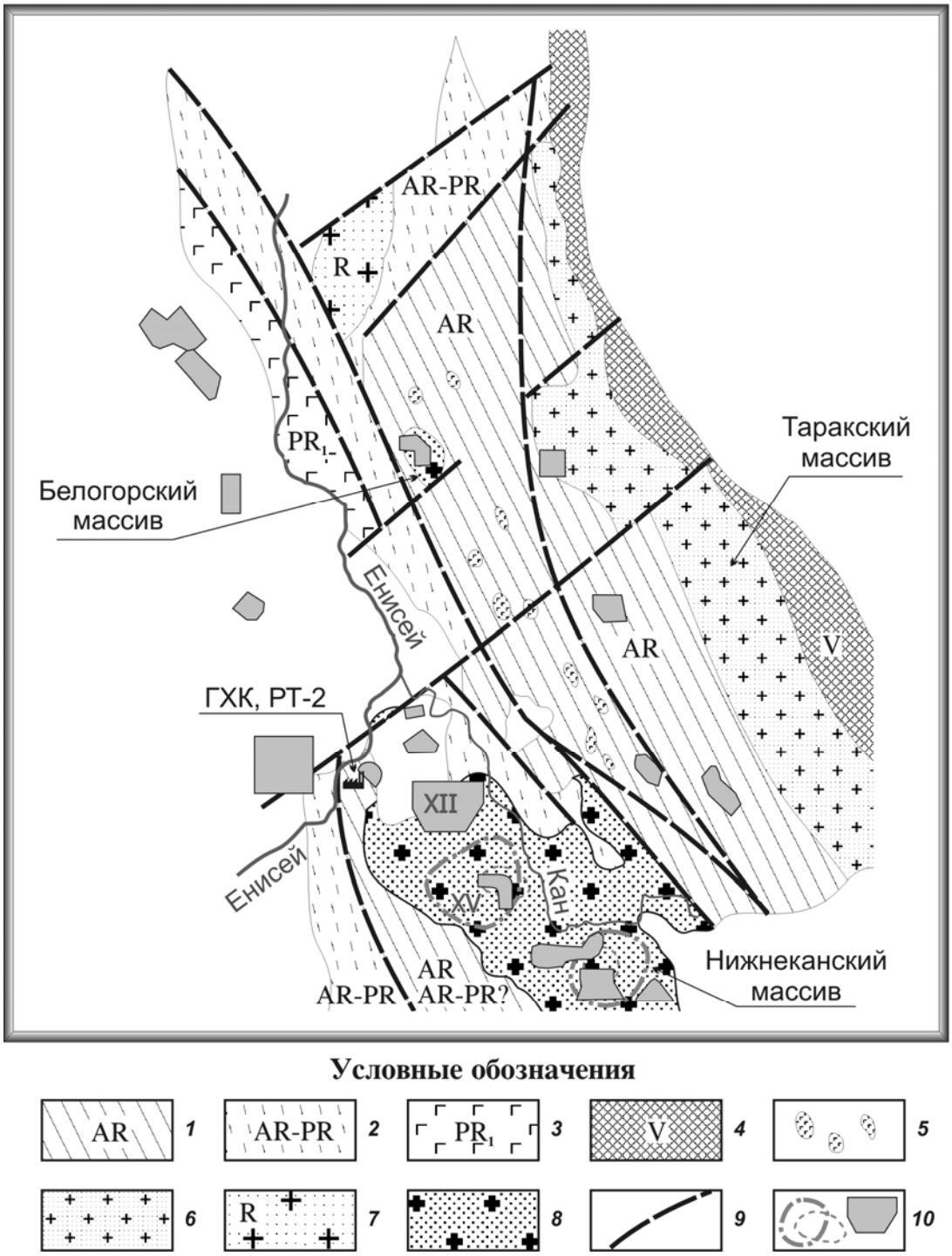
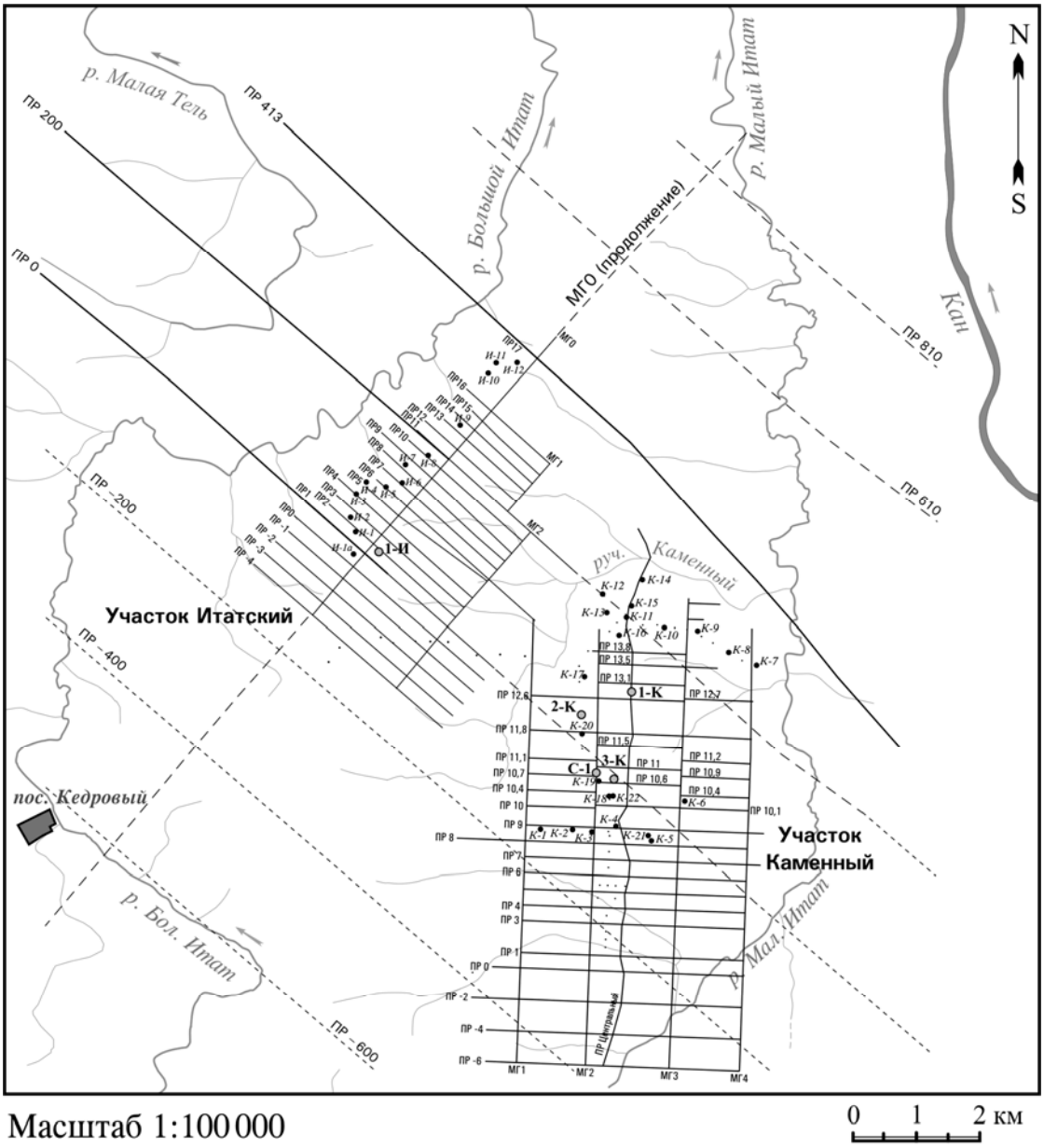


Рис. 3. Докембрийские формации южной части Енисейского кряжа. Масштаб 1:1 000 000:

1 – кузеевский и атамановский архейские метакомплексы; 2 – исаевский и среднянский архейско-протерозойские метакомплексы; 3 – предивинский метакомплекс; 4 – тасеевская свита; 5 – кимбирский комплекс метагаббро; 6 – таракский гранитовый комплекс; 7 – посольненский мигматит-гранитовый комплекс; 8 – нижнеканский гранитоидный комплекс; 9 – основные разломы; 10 – перспективные площади, выделенные при использовании различных данных, в масштабе 1:200 000.



Условные обозначения:

- Картировочные скважины (глубины 13 - 50,5 м)
- Глубокие скважины (300-700 м)
- Профили и отдельные точки наблюдений методом АМТЗ 1996-1999 гг.
- Профили электроразведочных работ 2001 г.
- Система профилей для запланированного продолжения работ методом АМТЗ

Рис. 4. Система профилей наземных электроразведочных работ и положение скважин на участках «Итатский» и «Каменный».

Перспектива использования массива для строительства крупного комплекса подземных сооружений Росатома стимулировала проведение поисково-съемочных и буровых работ, привлечение к участию в исследованиях местных геологических организаций. К настоящему времени получен большой объем разносторонних данных по массиву и его отдельным участкам.

Ниже приводится выборочная информация, характеризующая перспективные площадки и блоки гранитоидов Нижнеканского массива как потенциальную среду для подземной изоляции радиоактивных материалов.

3.1. Физико-географические условия

Северная часть Нижнеканского массива расположена на водоразделе Енисея и Кана, в континентальной области умеренного климатического пояса. Здесь, на площади около 700 км^2, расположены три различных по рельефу участка:

- Атамановский хребет на западе, начинающийся над подземными сооружениями ГХК и уходящий в южном направлении за пределы водораздела;
- долина Черского на севере;
- Итатская возвышенность на юге.

Невысокий Атамановский хребет (300-500 м) имеет крутые склоны, ограничивающие с востока долину Енисея. На Итатской возвышенности абсолютные отметки вершин составляют 230-540 м. Превышение вершин над донными уровнями рек – 100-250 м.

Долина Черского имеет равнинный, слабовсхолмленный рельеф. В её пределах расположена речная сеть Большой Тели, впадающей в Енисей, и притока – Малой Тели. Для Большой и Малой Тели характерны сильное меандрирование, заболоченность пойм и низкие берега в устьевых частях.

Восточнее, на территории Итатской возвышенности, располагаются два притока р. Кан – Большой и Малый Итат. Долины этих рек узкие, 30-35, реже до 150 м. Характерны перекаты и тектонические меандры. Сочетание выположенных водоразделов шириной до 3-5 км и крутовврезанных речных долин свидетельствует о стабильном поднятии района в наше время.

Территория северной части Нижнеканского массива представляет преимущественно денудационную равнину, осложненную достаточно развитой речной сетью. Правобережье Енисея представляет район низкогорного залесенного рельефа. Русла рек, особенно низовья Большой и Малой Тели, – выровненные заболоченные долины.

Климат района резко континентальный, с продолжительной суровой зимой и коротким жарким летом. Среднегодовая температура воздуха –0,5…–3,0 ºС. Среднемесячная температура января –20…–22; июля: +18…+20 ºС. Годовое количество осадков 540-560 мм. Осадки за ноябрь – март: 130-160 мм; апрель – октябрь: 390-400 мм.

Питание рек осуществляется талыми снеговыми водами весной и водами летне-осенних дождей. Питание грунтовыми водами невелико, менее 10%.

Отрицательная среднегодовая температура воздуха, близкая к изотермам, ограничивающим распространение криолитозоны (–2,0..–4,0 ºС), дает основание допускать активное развитие сезонной мерзлоты. Глубина сезонного промерзания (по данным Сухобузимской метеостанции) может достигать 210-300 см, минимально – 67-94 см. Полное оттаивание грунтов заканчивается только в июле. Такая криогенная обстановка играет весьма существенную роль в формировании подземного и поверхностного стоков. Сезонная мерзлота выступает не только в роли временного водоупора, усиливающего поверхностный сток весной и в начале лета, но и сущест-

венным образом ограничивает инфильтрационное поступление атмосферных осадков в глубь гранитоидного массива. Сезонная мерзлота грунтов является своеобразным климатическим барьером, снижающим подпитку зон разуплотнения и трещиноватости пород – главных каналов миграции.

Выровненные водоразделы являются фрагментами древнего пенеплена, сохранившиеся благодаря отсутствию в изучаемом районе покровных оледенений и дифференциальной эндогенной активности.

В мел-палеогеновое время (100-50 млн. лет) весь Южно-Енисейский кряж представлял собой грядовое расчлененное плато с высотами 200-300 м. В конце мела (75-65 млн. лет) в условиях субтропического климата и тектонической стабилизации формируется каолин-кварцевая кора. На водоразделе Большого и Малого Итатов её мощность составляет 5-15 м, а на переходе к малоизмененным гранитам развиты слои дресвы мощностью до 1-3 м.

Значительно лучше сохранилась региональная кора выветривания неоген-раннечетвертичного времени (5-1 млн. лет). В это время Южно-Енисейский кряж и вся Сибирская платформа находились в состоянии относительного тектонического покоя и представляли собой невысокие плато. В более холодных по сравнению с меловым периодом, близким к современным климатическим условиям, формировались монтмориллонитгидрослюдистые красноцветы. На водоразделах Кана, Большой Тели, Большого Итата, на вершинах и пологих склонах возвышенностей их мощность составляет 5-10 м.

3.2. Формирование и геологическое строение массива

Нижнеканский массив с общей площадью около 3 500 км^2 является одним из крупнейших в Средней Сибири.

Массив вытянут в северо-западном направлении более чем на 100 км в соответствии с ориентацией вмещающих тектонических глыб архея и протерозоя. Подводящий канал, согласно гравиметрическим данным, находится в его центральной части на глубине 3,5-4,0 км. По своим начальным параметрам Нижнеканский массив можно отнести к гранитоидным батолитам, формирование и становление которых определяются многими разноранговыми причинами: строением литосферы, временем консолидации литосферных блоков, глубиной зарождения расплавов и т. д. [31]. В батолитах наблюдаются симптомы внедрения магмы и признаки метасоматического замещения. История формирования батолитов может быть длительной с присутствием разноглубинных фаций пород. Нижнеканский массив может подтвердить наблюдаемую сложность, что выражается неоднозначными интерпретациями одних и тех же фактических данных [20, 34].

Массив расположен на юго-западном окончании Южно-Енисейского кряжа в зоне Приенисейского (или Байкало-Енисейского) глубинного разлома, ограничивающего, начиная с рифея (1650 млн. лет), с запада и юга Сибирскую платформу. К разлому в это время была приурочена сейсмофокальная зона в Заангарье, проявились вулканизм байкальского тектоно-магматического цикла и становление габбро-плагиогранитной формации в условиях растяжения. Смена режимов растяжения и сжатия способствовала формированию Приенисейской зоны смятия и появлению мигматит-гранитной формации посольненского комплекса. Дальнейшее сжатие, ориентированное в сторону Сибирской платформы, привело к субдукционным процессам [23, 32] и появлению Нижнеканского гранитоидного массива [18]. В дальнейшем процессы субдукции сменились сдавливанием структурных блоков, и в со-

ставе пород массива приняли участие продукты не только эволюции мантийного вещества, но и сиалического анатексиса.

Нижнеканский массив относится к полифазной гранитовой формации. В первую фазу внедрения формировались диориты, кварцевые диориты, тоналиты и гранодиориты, во вторую – биотитовые граниты и лейкограниты. Жильная фаза представлена жилами и дайками аплитов, пегматитов, диабазов, лампрофиров и кварца. Анализ петрохимических данных свидетельствует, что сформировавшая массив магма является результатом синтексиса дифференциатов подкорового вещества («I»-компонента) и продуктов анатектического плавления коры («S»-компонента) [18].

Формирование массива происходило в условиях мезозоны, перекрытой толщей пород мощностью порядка 5 км. На таких глубинах тектонические процессы дополнительно уплотняли среду своего воздействия с возникновением гранулитовых структур.

В современном разрезе диоритовые породы первой фазы представлены останцами кровли и ксенолитами среди гранитоидов главной фазы. Характерно развитие теневых структур уплощенных автолитов и шлиров переработанного «диоритового» субстрата, ориентированных согласно плоскопараллельной текстуре гранитов. На контактовых участках двух главных фаз наблюдаются процессы биотитизации, калишпатизации и сульфидизации [22]. По данным разбуривания центральной части массива (участок Каменный) наблюдается сварной характер контактов всех трёх последовательно образующихся фаз массива: диоритоидов, гранитоидов и жильной фазы. Между отдельными фациальными разновидностями пород и на контактах их с архейскими гнейсами в процессе становления массива происходили высокотемпературные физико-химические преобразования, размывающие границы различных структурно-минералогических составляющих [33].

Породами, вмещающими массив, являются архейские кристаллические сланцы и гнейсы, местами прорванные небольшими телами пород основного состава (габбро, габбро-нориты, нориты и т.п.), а также раннепротерозойские двуслюдяные сланцы и плагиогнейсы. Контакты с вмещающими породами полого погружаются под гранитоиды, чем определяется воронкообразная в разрезе форма массива.

На северной границе массива, по р. Кан и устьям рек Большого и Малого Ита-та плагиогнейсы и кристаллические сланцы архея на протяжении 3-5 км интенсивно изменены внедрением мелких тел гранитоидов и сплошной послойной мигматизацией. Все минералы гнейсов, кроме кварца, замещаются агрегатом мусковита и биотита.

На востоке по р. Кан в устье р. Сокаревки архейские гранат-гиперстеновые гнейсы прорваны гранитными сателлитами, мигматизирующими вмещающую толщу. Пироксен при этом замещается роговой обманкой, гранат – биотитом и кварцем, плагиоклаз – мусковитом.

На юге и западе породы Нижнеканского массива контактируют с архейскими биотитовыми гнейсами атамановского комплекса. Контакт с ограниченным влиянием интрузии гранитов установлен лишь по р. Кантат. В одной из последних тектонических моделей [34] значительная часть атамановского комплекса, оконтуривающего массив на западе, отнесена к реоморфическим гранитам.

Повышенное внимание к зонам контактов различных по составу и структуре пород при выборе площадок подземной изоляции РАО связано с возможностью возникновения на контактах участков с повышенной проницаемостью, то есть потенциальных каналов миграции. При анализе таких зон для конкретных площадок и блоков гранитоидов должны быть учтены все компоненты миграционной системы: водная фаза переноса, минералогическое окружение и геохимическая среда.

3.3. Минералого-петрографическая характеристика гранитоидов

По полученным ранее данным химических анализов гранитоиды Нижнеканского массива относятся к нормальным известково-щелочным породам, минералогические разновидности которых отвечают фазам магматической дифференциации исходного расплава [18]. Основные группы гранитоидов имеют сравнительно однородный химический состав (табл. 2).

Таблица 2

Химическая характеристика гранитоидов Нижнеканского массива

Тип пород	Количество проб	% масс., от – до / среднее		
		SiO_2	Al_2O_3	(Na+K)/Ca
Гранодиориты	7	62,10-68,31 66,80	14,70-16,90 16,16	2,15-5,24 3,53
Известково-щелочные граниты, адамелиты	23	68,73-74,30 71,96	12,91-17,47 14,69	4,41-12,70 7,59
Лейкограниты нормальные и высокоглиноземистые	17	73,60-79,33 75,60	10,71-14,09 13,00	4,32-17,15 9,48

Закономерно изменяется и коэффициент агпаитности, что свидетельствует о возрастании роли кремнекислоты и щелочей (особенно калия), при кристаллизационной дифференциации расплава: в диоритах 0,64; в гранитах 0,73; в аляскитах 0,92 [22].

Гранитоиды характеризуются невысокими содержаниями воды – от 0,29 до 0,37% масс., что может быть связано с мантийным прогревом очагов гранитоидного расплава. Флюиды этих пород являются водородно-водными с высоким коэффициентом восстановленности: отношение суммы $CO+CH_4+H_2$ к сумме CO_2+H_2O достигает 0,37.

Смешанные мантийно-коровые гранитоиды Нижнеканского массива отличаются от коровых гранитоидов Енисейского кряжа наименьшим содержанием воды и водорода, а также наиболее высокой восстановленностью [18].

Один из базовых критериев выбора площадок требует оценки на участке хранилища потенциальных геологических ресурсов, полезных ископаемых. В геохимических исследованиях для этой цели используют определения минимально-аномальных содержаний элементов в горных породах. Проведенные оценки для проб из скважин на участках Каменный и Итатский показали их неперспективность для промышленного оруденения [35].

Определенный интерес представляют количества в гранитоидах элементов – химических аналогов изолируемых радионуклидов (табл. 3).

Содержание элемента-аналога, например церия, в горном отводе с преобладанием диориотовых разностей пород объемом 1 км^3 составит около 50000 т. Столь значительные количества церия обладают потенциальной способностью для изоморфного и изотопного обмена с изолируемым церием-144 и более долгоживущими радионуклидами – аналогами фракции трансплутониевых элементов и редких земель [36].

Таблица 3

Содержание в породах массива элементов – химических аналогов изолируемых радионуклидов

Элементы	Содержание в породах, 10^{-3}% [18, 35]	
	Диориты, гранодиориты	Граниты, лейкограниты
Стронций	102	31,1
Цирконий	7,0	8,6
Молибден	0,15	0,15
Олово	0,18	0,11
Барий	44	31
Лантан	3,4	3,4
Церий	2,0	2,2
Торий	0,39	0,88
Уран	0,08	0,17

Представление о взаимоотношениях и количественном соотношении разновидностей гранитоидов дают колонковые разрезы скважин, пробуренных на участках Итатский (1-И) и Каменный (1-К) (табл. 4).

Таблица 4

Обобщенные разрезы по скважинам 1-И и 1-К

Скважина 1-И		Скважина 1-К	
Интервал	Литологический состав	Интервал	Литологический состав
0,0-23,0	Глинисто-песчаная кора выветривания	0,0-75,0	Четвертичные и юрские отложения
23,0-141,4	Гранодиориты серые среднезернистые	75,0-110,0	Граниты лейкократовые
141,4-173,7	Граниты лейкократовые милонитизированные	110,0-145,0	Гранодиориты
173,7-305,0	Гранодиориты	145,0-497,0	Граниты лейкократовые, дайки аплитов, микрогранитов, диабазов, лампрофиров
305,0-325,0	Граниты лейкократовые		
325,0-435,0	Гранодиориты		
435,0-478,0	Граниты		
435,0-505,0	Гранодиориты	497,0-703,0	Гранодиориты, кварцевые диориты и тоналиты первой фазы

На участке Итатский вскрыт разрез с преобладанием кварцевых диоритов и гранодиоритов первой интрузивной фазы. В них присутствуют редкие ксенолиты гнейсов и поздние внедрения по трещинам в консолидированные участки диоритов апикальной части массива лейкогранитов второй фазы.

На участке Каменный вскрыты преимущественно гранитоиды второй (основной) фазы внедрения. Диоритовые породы первой фазы представлены в нижней части разреза на глубине 497 м. Дайковые породы основного состава рассекают гранитоиды обеих фаз.

Наиболее представительной породой первой фазы являются гранодиориты. Ведущим минералом в них является кальциевый плагиоклаз, анортит. Как правило, он характеризуется идиоморфными таблитчатыми очертаниями. Средний размер зерен 2-3 мм. Наблюдаются наложенные процессы дробления ранней генерации с последующим залечиванием микротрещин. Широко распространено явление пелитизации – развитие вторичных мелкодисперсных глинисто-слюдистых минералов. Количество кварца составляет от 15 до 20%. Минерал, как правило, ксеноморфен, размеры его от десятых долей до 3-4 мм. Содержание калиевого полевого шпата варьирует от единичных процентов до 15%. Несет следы воздействия катаклаза и пелитизации. Биотит – основной цветной минерал в гранодиоритах, содержание его колеблется от 5 до 10%. Вдоль плоскостей спайности нередко хлоритизирован. С биотитом часто ассоциируют постоянно присутствующий магнетит – 0,5-2,0% – и акцессорный сфен.

Для второй (основной) фазы наиболее характерны лейкократовые граниты – весьма монолитная, средне-крупнозернистая порода с дымчато-серым кварцем и редкими чешуйками биотита. Структура гранитов гипидиоморфно-зернистая. Количественные соотношения трёх основных минералов – калиевого полевого шпата, плагиоклаза и кварца – варьируют в пределах: 35-40, 15-25 и 30-35%, соответственно. Некоторые кристаллы и краевые части зерен калиевого полевого шпата представлены решетчатым микроклином. Минерал частично пелитизирован. Таблитчатые кристаллы плагиоклаза имеют размеры не более 5 мм. По сравнению с другими минералами он более идиоморфен. Плагиоклаз (олигоклаз) в различной степени пелитизирован, несет следы протоклаза, с залечиванием дробленых участков чешуйками серицита. Кварцевые зерна имеют размеры 0,2-3 мм, несут следы воздействия тектонических деформаций (волнистое угасание, полоски Бэма). Биотитовые пластинки (0,3-1 мм) обычно по краям или вдоль спайности замещаются хлоритом. Магнетит (зерна 0,1-0,5 мм) составляет, как правило, 0,4-0,6% от породы. В числе акцессорных минералов присутствуют апатит, циркон, титаномагнетит, лейкоксен и монацит [18].

Минералого-петрографические иследования керновых проб позволяют выделить ряд особенностей гранитоидов массива, характеризующих их как среду для изоляции радионуклидов:

1. Различие фазовых разновидностей, неоднородности структуры и текстуры не отражаются на общей монолитности и массивности гранитоидов, поскольку все фациальные переходы крайне постепенные. Открытая пористость пород носит обычно незерновой характер, и её величина варьируется в пределах

0,28-0,82%, в среднем – 0,5%. Значительно выше открытая пористость дайковой фазы: в диабазовых порфиритах до 3%, в микросиенитах до 9,4%. В основном это округлые или уплощенные газовые пустоты, частично заполненные карбонатами, серицитом и кварцем. Оценить возможности дайковых образований как миграционных каналов радионуклидов могут лишь натурные крупномасштабные испытания в подземной лаборатории.

2. Для гранитоидов массива характерно явление протоклаза – деформации кристаллов до консолидации расплава. Протоклаз неинтенсивный, с высоким уровнем залеченности нарушений, о чем свидетельствует сравнение физико-механических свойств в различной степени деформированных пород. Тем не менее, дефектные структуры в кристаллах минералов могут существенно увеличить величину удержания микропримесей, присутствующих в мигрирующих растворах [37].
3. Полевые шпаты в гранитоидах массива пелитизированы. На границах кристаллов, по трещинам спайности или по контурам зональности, развивается микродисперсная масса вторичных глинисто-слюдистых минералов (рис. 5). Объемная лабиринтная система межзерновой пористости пород, через которую может происходить водная фильтрация радионуклидов, содержит природные сорбенты с большой свободной поверхностью. Именно этой особенностью гранитоидов можно объяснить их высокие удерживающие свойства относительно радионуклидов [38].

В большинстве магматогенных пород составляющие их минералы разделены объемной системой образованных в результате наложенных процессов метаморфизма (автометаморфизма) микротрещин и пор, в различной степени заполненных микродисперсными минералами. Конфигурация межкристаллического пространства сложная. Контактирующие минералы могут иметь участки непосредственного соприкосновения, форма и протяженность открытых пор и трещин чрезвычайно изменчива, с различными по макро- и микроразмерам участками фильтрации вод и участками, изолированными от общей системы инфильтрации растворов.

Объемная система межкристаллических микропор и микрокапилляров хорошо наблюдается в каменной соли с прозрачными кристаллами галита [39]. Для галитовых пород установлено образование новых микротрещин при снятии литостатического давления. Аналогичное явление происходит и в гранитоидах, для которых пористость за счет всестороннего сжатия пород в интервале глубин от 50 до 1000 м снижается с 0,5 до 0,06% [40].

Неадекватность природных условий и условий проведения лабораторного и даже натурного эксперимента вносит определенные ограничения на моделирование и прогнозирование миграционных процессов [41, 42]. Тем не менее, минералого-петрографические и геохимические исследования гранитоидов Нижнеканского массива позволяют положительно оценить роль наложенных метаморфических процессов, при которых внутри потенциальных межкристаллитных каналов миграции образовалась ассоциация микродисперсных минералов – природных сорбентов. Для полевых шпатов это серицит и каолинит, для биотита – хлорит.

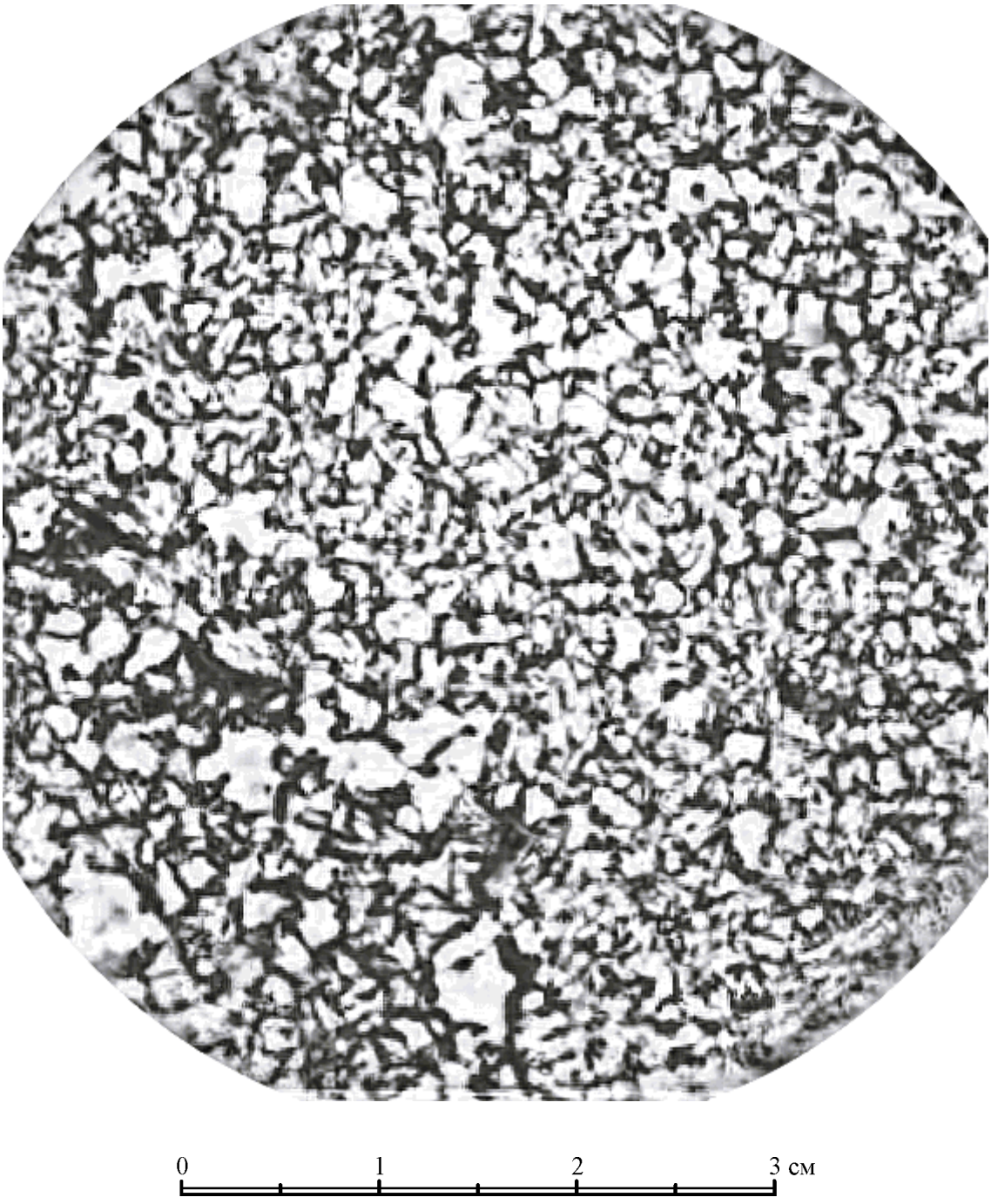


Рис. 5. Сорбция красителя на пелитизированных и серицитизированных участках полевых шпатов в зонах межзерновой трещиноватости гранитов (×3 раза).

3.4. Тектоника

Приповерхностная часть литосферы имеет развитую систему структурных нарушений, представленных тектоническими разломами и трещинами различного масштаба, которые ограничивают сравнительно монолитные структурные блоки. Существующая динамическая блочно-иерархическая структура является одним из фундаментальных свойств геологической среды [43]. При этом именно дифференци-

альные движения блоков определяют долговременную механическую целостность массивов, их несущие способности и изолирующие свойства [44]. Породы, заполняющие межблоковые промежутки, имеют не только пониженную прочность, но обладают повышенной проницаемостью и водонасыщенностью, то есть являются миграционными структурно-геохимическими зонами. При этом любые дизъюнктивы могут быть как проводниками, так и экранами для флюидов, причем проводящие разрывные нарушения со временем могут переходить в разряд экранов [45].

В тектонически активных и в стабильных регионах имеются активные тектонические нарушения на всех масштабных уровнях. В земной коре постоянно идут процессы различного пространственно-временного уровня: землетрясения, деформации зон разломов, дифференциальные движения блоков и т.п. Все эти явления характерны и для Южно-Енисейского кряжа и составляющих его структур.

Нижнеканский массив расположен в зоне сочленения Южно-Енисейского кряжа с Западно-Сибирской плитой, от которой породы кряжа отделены системой параллельных субмеридианальных разломов, главным из которых является Муратовский. По этому разлому амплитуда смещения кровлевой части докембрийского фундамента достигает 720 м (рис. 6).

Нижнеканский массив, как и все анизотропные интрузивные массивы, имеет систему первичных трещин отдельности:

- пластовые трещины с углами наклона 5-20 градусов, определяющими пологое погружение массива на восток;
- вертикальные трещины субширотного направления, расположенные перпендикулярно линейности пород, – трещины растяжения;
- вертикальные трещины, ориентированные в субмеридианальном направлении и рассматриваемые как первичные продольные трещины.

С первичными трещинами различной ориентации могут быть связаны жилы и дайки завершающей фазы формирования массива.

Северная часть Нижнеканского массива, в пределах водораздела рек Енисей – Кан рассечена серией глубинных разломов – магистральных тектонических нарушений, подвижки по которым продолжаются и в наше время. Ориентация разломов субмеридианальная, хорошо выраженная в рельефе руслами рек. К востоку от Муратовского разлома последовательно расположены разломы: Правобережный, разлом долины Черского, Большетельский, Малотельский, Большой и Малый Итатские, Канско-Енисейский [28, 46]. Движения по разломам носят сбросово-сдвиговый характер с различными амплитудами и направленностью смещения блоков. Разломно-блоковая структура северной части массива представляет систему тектонических ступеней, гипсометрические отметки которых снижаются с востока на запад: от приподнятого края Сибирской платформы к относительно опущенной Западно-Сибирской плите. Ширина («шаг») ступеней 5,0-5,5 км, амплитуды смещения – от десятков до сотен метров. Субмеридианальные разломы, по крайней мере Большетельский и Малотельский, существовали в докембрийское время. Стабильный режим территории с отсутствием тектонических поднятий наблюдался в эоцене и продолжался 35-45 млн. лет до границы миоцена и плиоцена (около 5 млн. лет назад), когда началось неотектоническое поднятие района [46].

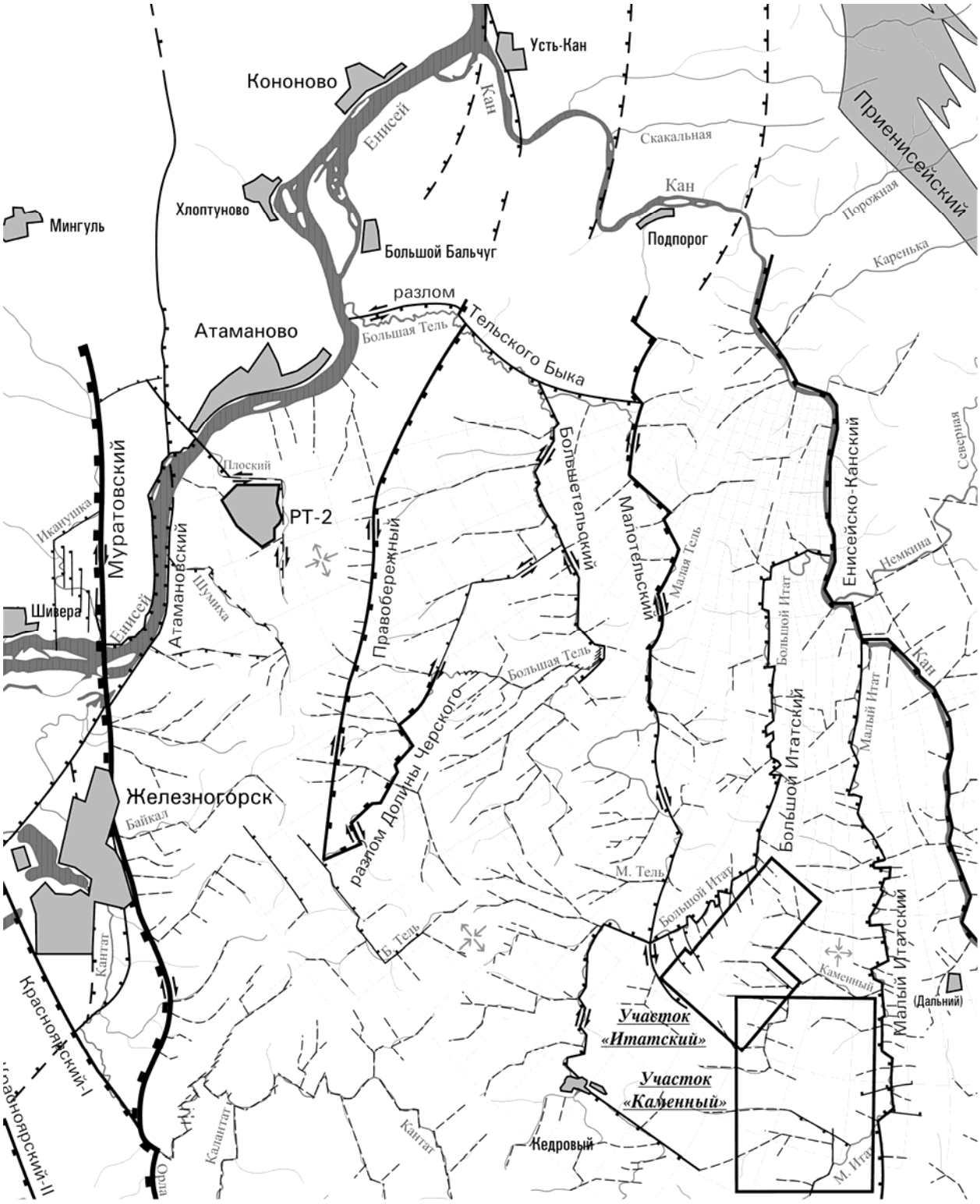


Рис. 6. Система разломов Енисейско-Канского междуречья по Н. В. Лукиной (ГИН РАН).

Формирование разломов сопровождается деформированием окружающих их горных пород, образованием оперяющих трещин, тектонических напряжений – зон динамического влияния. Ширина этих зон зависит от длины активного разлома. Так, например, для Малого Итатского разлома ширина зоны динамического влияния на поднятом крыле составляет 1,3 км, а на опущенном – 1,15 км. Для Канско-Енисейского разлома эти величины равны 1 км.

В зонах динамического влияния активных разломов происходит трансформация полей тектонических напряжений. В результате формируются закономерно ориентированные по отношению к активным разломам трещины: открытые, совпадающие по направлению с траекториями сжимающих напряжений, и закрытые, притертые – перпендикулярные к ним.

За пределами зон динамического влияния породы массива остаются неизменными и подчиняются современному региональному полю напряжений.

В результате изучения тектонической нарушенности геологической среды северной части Нижнеканского массива определились дополнительные, региональные, критерии выбора площадок [11, 46]:

- для сооружения подземных хранилищ используются участки водоразделов, на которых русла рек, проходящие по крупным тектоническим разломам, выделили массивные, малопроницаемые блоки гранитоидов;
- подземные выработки с изолируемыми РАО нельзя располагать в зонах динамического влияния активных тектонических разломов.

Кроме активных разломов в пределах северной части массива развиты протяженные (5-7 км) прямолинейные мегатрещины. Ориентация раскрытых трещин для западной и восточной части изучаемой территории оказалась различной: на западе это СВ, на востоке – ССЗ и ССВ. Причиной является различная кинематическая характеристика полей тектонических напряжений к западу и востоку от Большого Итатского разлома [46].

По мере укрупнения масштабов комплексных геолого-геофизических и специализированных исследований на отдельных участках массива, составления карт неотектонических блоков и разломов, активных разломов и мегатрещин масштаба 1:50 000, выявлялись детали структурно-тектонического строения гранитоидов [47]. Для участков Итатский и Каменный характерны субширотные разрывные нарушения; менее развиты северо-восточные и северо-западные. По времени формирования выделяются как древние, рифейские, так и неотектонические.

Древний возраст заложения субширотных нарушений доказывают процессы катаклаза и милонитизации жильных аплитов, приуроченных к аналогично ориентированным первичным поперечным трещинам массива. Кроме того, в ряде случаев аплитовые жилы пересекают зоны милонитизированных гранитов и гранодиоритов [22].

В прочных горных породах с низкой пористостью разрывные нарушения являются основными каналами миграции. Движение растворов вдоль трещин во много раз быстрее, чем через системы рассеянных пор, даже если общий объем последних гораздо больше поперечного сечения трещин. Сами трещины нельзя рассматривать как геометрическое пространство, ограниченное двумя плоскостями горной породы. Конфигурация водопроводящих трещинных каналов сложная, с тупиковыми участками застойных вод. Трещины не являются пассивными каналами перемещения растворов. В них происходит не только миграция элементов, но и отложение минералов. Возникающие при трещинообразовании градиенты давления определяют гидродинамический режим внутриформационных вод, влияют на формирование водород-

ного показателя, на процессы изменения энергетического и химического состояния вещества [48, 49].

Разрывные нарушения различного масштаба, являющиеся потенциальными каналами миграционных процессов, требуют наиболее тщательных и всесторонних исследований [50]. На Нижнеканском массиве эти работы проводились поэтапно, с последовательным увеличением масштабов съемочно-поискового картирования и использованием различных методов определения структурно-тектонических параметров пород [1, 47]. Результаты проведенных исследований представлены геолого-тектоническими или структурно-тектоническими моделями, охватывающими различные по объемам участки массива [1, 28, 33].

Развивая и конкретизируя базовые тектонические критерии [5, 6], необходимо выделить и поэтапно исследовать несколько разномасштабных структурно-тектонических моделей, направленных на решение комплекса задач по выбору площадок и по прогнозированию условий подземной изоляции РАО:

1. Модель Южно-Енисейского кряжа (масштаб 1:1 000 000), характеризующую кряж как элемент континентальной геологической структуры [34]. Анализ её формирования и эволюции в прошлом обосновывает долгосрочный прогноз тектонического развития рассматриваемого региона.
2. Модель междуречья Енисей – Кан, северной части Нижнеканского массива и его обрамления (масштабы от 1:500 000 до 1:50 000) [1, 28, 33], которая определяет:
   - форму и положение массива в структуре Южно-Енисейского кряжа;
   - взаимоотношение гранитоидов с вмещающими породами;
   - характер и особенности разломно-блокового строения массива;
   - параметры массивных слабопроницаемых участков и ограничивающих их разрывных нарушений;
   - характеристики структурно-геохимических зон миграции;
   - разработку дополнительных критериев выбора площадок в пределах массива;
   - исходные данные для прогноза условий подземной изоляции РАО.
3. Модель перспективных участков (масштаб 1:25 000 и более), построенную по данным как дистанционных геофизических методов, так и прямых исследований разведочного бурения [33]. Модель определяет:
   - конфигурацию и взаимоотношения различных по составу и структуре пород;
   - тектоническое строение и структуру разрывных нарушений различных рангов и генезиса;
   - основные свойства гранитоидов как среды изоляции (петрофизические, петроструктурные, физико-химические и пр.);
   - гидрогеологические параметры;
   - основные типы структурно-геохимических зон миграции, их структурно-геологические свойства.

По результатам интерпретации электро-, магнито- и гравиразведочных работ (масштабы 1:50 000-1:25 000) в пределах северной части участка Каменный выделен блок монолитных гранитоидов площадью около 12 км^2, перспективный для дальнейшей детальной разведки [33]. Анализ геолого-геофизических исследований позволил в пределах этого же блока выделить сравнительно монолитный участок био-

титовых гранитов площадью 1,5 км^2 для строительства подземной исследовательской лаборатории [22].

В двух случаях выбора в качестве начальных обоснований выдвигались уровни соответствия с базовыми и региональными тектоническими критериями.

Тектонические условия северной части Нижнеканского массива потребуют для эксплуатируемого и законсервированного хранилища организации геофизического мониторинга с использованием современных методов и специальных комплексов. Например, метод регистрации акустической эмиссии/микросейсмической активности, который может быть использован для контроля накопления повреждений (трещинообразования) и деформации в ближней зоне хранилища, в инженерных барьерах и отвержденных блоках РАО [51]. Практическое применение нашла концепция гидрогеодеформационного (ГГД) поля Земли [52]. Технология ГГД-мониторинга позволяет дифференцированно рассматривать деформационные процессы в пределах как отдельных блоков, так и крупных ареалов. Эта же технология может быть успешно использована для целей сейсмопрогноза в совокупности с картами общего сейсмического районирования, построенных на линеаментно-доменно-фокальной модели источников землетрясений [53].

3.5. Гидрология и гидрогеология

Значение гидрогеологического критерия установлено базовым определением в геологической концепции: основным механизмом миграции радионуклидов из пункта подземной изоляции является их движение в водной фазе. Вполне очевиден главный критерий: ограничение потока подземных вод внутри хранилища (могильника) [5].

Минимизировать количество подземных вод можно при размещении площадок в пустынных, засушливых местах, как, например, в проекте «Юкка Маунтин» в США. Выбранный горный массив находится в засушливом районе, в котором большая часть осадков (ежегодно около 178 мм) испаряется или теряется до того, как просочиться в грунт. Конфигурация подземных выработок и инженерные барьеры гарантируют отсутствие контактов инфильтрационных вод и отходов в течение 10 тыс. лет [54].

Диаметрально противоположное размещение потенциального участка подземного хранилища окончательного удаления ОЯТ – подземная лаборатория на о. Эспё (Швеция, островная зона Балтийского моря) [55]. Безопасность изоляции, минимизацию притока подземных вод обеспечивает блок малопроницаемых гранитоидов вне зон трещиноватости на глубине 500 м. Для заключительной оценки безопасности необходимо наблюдение модельного захоронения в течение 20 лет.

Нижнеканский массив расположен в континентальной области умеренного климатического пояса с годовым количеством осадков 540-560 мм. Формирование его рельефа типично для земной поверхности в целом: сочетание склонов различной крутизны, образующихся при тектонических поднятиях и эрозионном врезании гидросети. Основные реки, ограничивающие и образующие водораздел в пределах площади северной части массива, – Енисей и Кан. Внутри водораздела – система дренирующих малых рек. Карта изолиний рельефа дает общее представление об областях с различным гидродинамическим режимом приповерхностных вод трещинно-грунтового стока. Области питания – над возвышенной южной частью водораздела, область транзита и разгрузки – по понижениям и долинам рек и области разгрузки –

по руслам и прибрежным частям водной системы: Енисей, Кан и их притоками Большой и Малой Телью, Большим и Малым Итатом.

Аккумуляция атмосферных осадков происходит на плоских водоразделах, сложенных элювиальными суглинками и глинами. Протяженность плоских водоразделов от 1,2 до 10 км, ширина – 0,3-1,5 км и более. Преобладающие высоты водоразделов от +300 до +600 м. Водоносную зону экзогенной трещиноватости Нижнеканских гранитоидов можно характеризовать как водообильную, с максимальным наполнением в начале лета и наименьшим – зимой. Её максимальная мощность достигает 50-70 м. В среднем глубина залегания зеркала грунтовых вод под осевыми линями водоразделов притоков Енисея и Кана составляет 20-30 м.

Гидрохимические исследования, проведенные КГПИИ, ВНИПИЭТ, ЗАО «Гея» и ЭГП «Ноосфера», показали:

1. По величине общей минерализации во́ды поверхностных водотоков и источников являются исключительно пресными. Значения общей минерализации лежат в интервале 50-450 мг/л, при типичных количествах – 150-300 мг/л.
2. По составу главных водорастворенных солей во́ды гидрокарбонатно-кальциевые. Молярная доля HCO_3 обычно близка к 95%, а молярная доля Ca^{2+} в сумме катионов – 75% при резко подчиненном положении магния, натрия и калия.
3. По величине pH – во́ды преимущественно слабощелочные и нейтральные (значения 6,7-8,1).
4. При средней величине Eh около +125 мВ почти для 95% проб вод из ручьёв и источников это значение не опускается ниже «0», а в 85% проб оно выше +50 мВ.

Анализ полученной информации позволяет сделать следующие заключения:

- гидрохимические характеристики дают основания для вывода об инфильтрационном происхождении подземных вод и о преимущественно подземном питании поверхностной гидросети. Все типы наземных водопроявлений существенно отличаются от атмосферных осадков;
- существующие значения Eh типичны для зон интенсивного водообмена и могут свидетельствовать о том, что на изучаемой территории в восходящую разгрузку вовлечены лишь подземные воды неглубоких горизонтов.

Гидрогеологические исследования массива находятся в начальной стадии, поэтому основные сведения о глубинных подземных водах базируются на данных опробования поверхностных вод и единичных скважин.

В бассейнах рек Кан, Большой Итат, Большая и Малая Тель на площади свыше 500 км^2 водоносными являются трещиноватые гнейсограниты, биотитовые и биотит-мусковитовые граниты. Источники приурочены к зонам надвигов и разломов. Одновременно значительная часть источников находится вне зон разрывных нарушений на крутоврезанных склонах массива. По характеру рельефа и связи источников с зонами разломов различного порядка можно предполагать о существовании наряду с линейными резервуарами трещинных вод крупных водных потоков, разгружающихся в реки Енисей и Кан. Сопоставляя абсолютные отметки поверхности гранитоидов (+573 м), минимальную отметку Енисея (+113 м) и глубину вреза его русла в коренные породы (около 100 м), можно оценить глубину циркуляции атмосферных вод по зонам разломов до 500 м.

В скважине 1-К (участок Каменный) зафиксированы водопроявления в интервале глубин: 538-549; 559-562 и 686-690 м [20]. Прямые гидрогеологические иссле-

дования показали, что коэффициент фильтрации в зонах трещиноватости на глубине 500 м не превышает 10^{-4}-10^{-5} м/сут.

Рассмотрен наиболее вероятный вариант гидрогеодинамического режима в северной части Нижнеканского массива, вытекающий из известных ситуаций в близких по составу и структуре участках литосферы [56]. Определяющими параметрами такого режима являются положение области питания, основные каналы перемещения вод, направления транзита и места разгрузки.

Недра Нижнеканского массива, как и другие области байкальской складчатости, охвачены инфильтрационным (гидростатическим) режимом подземных вод. Отсутствие геостатического и глубинных механизмов формирования напоров на глубинах до 2-3 км или их крайне малое влияние на гидродинамическую структуру гранитоидного массива определяет отсутствие восходящих фильтрационных водных потоков. Преобладание нисходящих инфильтрационных потоков создает гидродинамическую защищенность приповерхностных и наземных сред, проявляющуюся наиболее эффективно на водораздельных пространствах. Пространства речных долин более вероятно рассматривать как области инфильтрационной разгрузки с восходящими направлениями водных потоков. Основные объемы подземного стока реализуются в зонах поверхностной трещиноватости (до глубин 50-100 м), по зонам проницаемых тектонических и стратиграфических нарушений. Глубинные разрывные нарушения северной части массива по направленности близки к вертикальным. К таким же направлениям будут приурочены концентрированные фильтрационные потоки (нисходящие и восходящие), а рассеянные – к субгоризонтальным трещинным системам низших порядков (рис. 7).

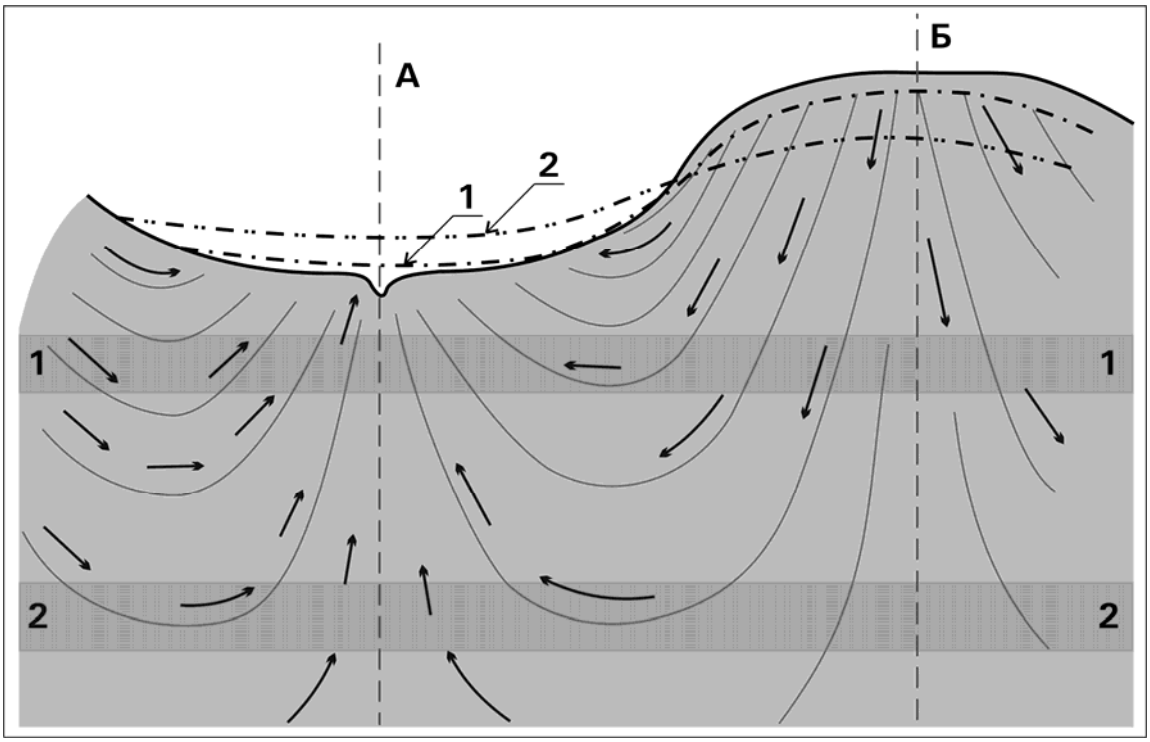


Рис. 7. Принципиальная схема инфильтрационного водообмена (линии тока в поперечном разрезе долины и водораздела):

осевые линии: А – долины; Б – водораздела; водоносные горизонты и пьезометрические уровни подземных вод: 1 – для верхнего горизонта; 2 – для нижнего горизонта.

Для окончательной оценки пригодности отдельных участков необходимо проведение специализированного бурения глубоких скважин, сопровождаемого геофизическими изысканиями и полным комплексом гидродинамических исследований.

Выделение гидрогеологических исследований в ранг определяющих безопасность критериев определяется существующей в природных условиях взаимосвязанной физико-химической системы: горная порода – вода. Водная фаза «связывает» литосферные блоки различных рангов и размеров, создавая сложную по конфигурации и физико-химическим параметрам водную миграционную систему. Именно эти параметры будут создавать миграционные или фиксирующие барьерные условия для вышедших за пределы хранилища радионуклидов.

В верхних частях гранитоидов Нижнеканского массива, в зонах гипергенеза и развития трещиноватости, следует ожидать сохранения водными растворами основных свойств поверхностных вод. При этом необходимо отметить, что низкоминерализованные гидрокарбонатно-кальциевые воды со слабощелочными или нейтральными значениями pH и близкими к буферным значениям окислительного потенциала Eh создают в большей степени барьерные, чем миграционные условия примесным элементам [57]. Присутствие в зонах трещиноватости вторичных глинистых минералов и гидроокислов железа существенно увеличивает барьерные свойства приповерхностных участков гранитоидного массива.

Изменения параметров подземных вод могут происходить по мере их продвижения в глубь гранитоидного массива. Взаимодействия сложных водных растворов, содержащих растворимые соли, газы, органические вещества и коллоиды с не менее сложным минеральным комплексом горных пород, могут приводить как к увеличению миграционных процессов, так и к полному их подавлению. Например, по мере заглубления подземные воды обедняются кислородом, что существенно ограничивает миграцию ряда разновалентных радионуклидов, например плутония и америция. На процессы рассеяния и концентрации элементов переменной валентности влияет также окислительно-восстановительный потенциал подземных вод, который, в свою очередь, регулируется реакциями железосодержащих минералов. Взаимодействие водных растворов с гранитами, содержащими кларковые концентрации хлора и серы, приводит к увеличению хлоридно-натриевой и сульфатно-натриевой составляющих водной фазы [58]. Для кристаллических щитов, сложенных гнейсово-гранитоидными породами (Канадского, Балтийского, Украинского, Бразильского) в интервалах глубин 108-1650 м обнаружены трещинно-жильные минерализованные воды и рассолы существенно хлоридного состава с минерализацией 280-325 г/л [59]. Изменение химизма подземных вод сопровождается существенным уменьшением объема водной фазы и образованием в трещинных водах гравитационно-устойчивой системы вертикальной закрытости.

Сложная, многозональная система внутриформационных подземных растворов с изменяющимися физико-химическими свойствами требует детальных гидрогеологических исследований перспективных участков, проведения натурных испытаний, использования для составления гидрогеологического прогноза природных и техногенных аналогов [12].

3.6. Барьерные свойства гранитоидов

В общепринятой концепции безопасность изоляции радиоактивных отходов в геологических формациях обеспечивается системой искусственных (инженерных) и естественных барьеров [5, 40] (рис. 8).

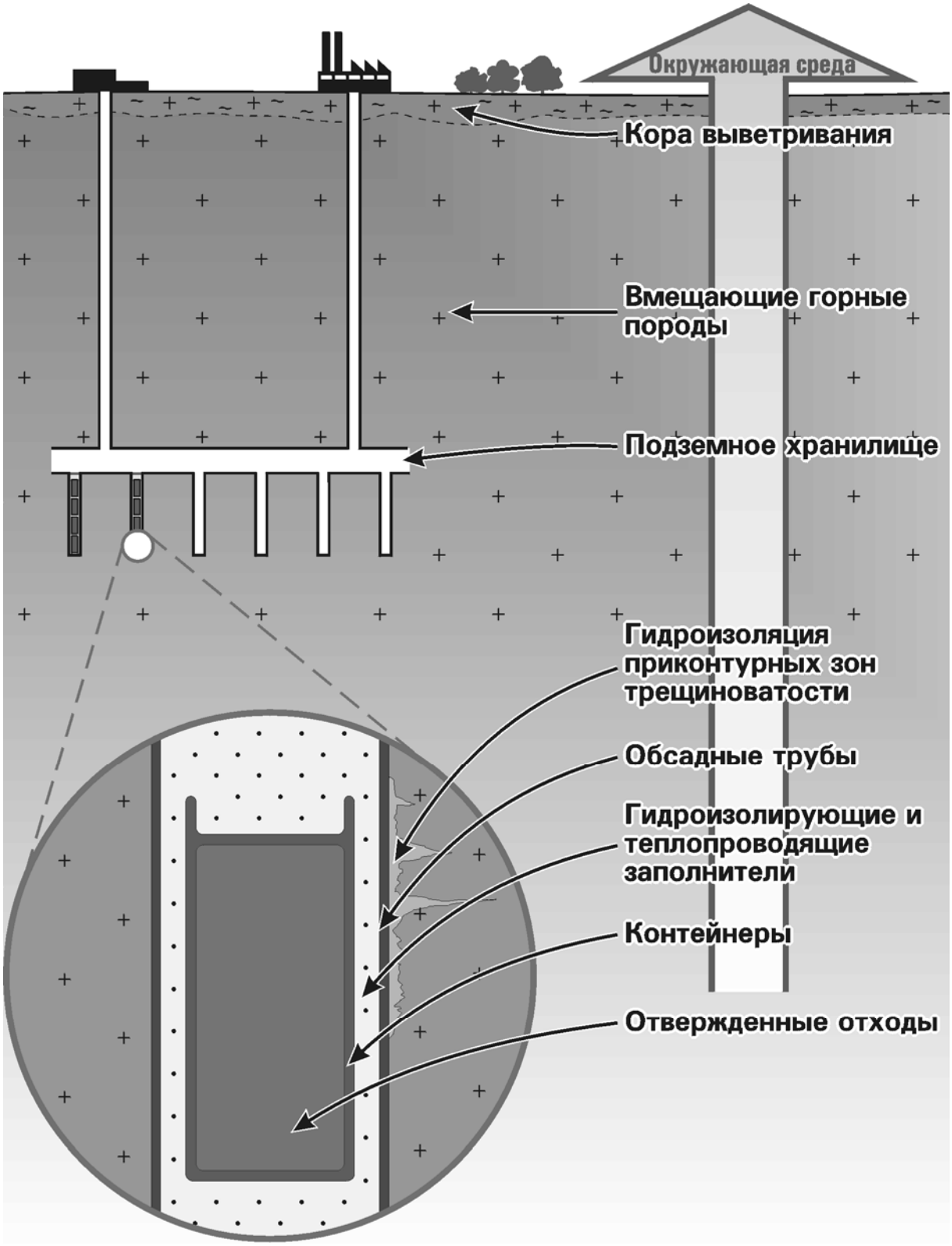


Рис. 8. Схема многобарьерной защиты подземного хранилища РАО (по [40]).

Для долгоживущих радионуклидов требование полной изоляции в геологических формациях неприемлемо, поскольку нельзя обеспечить и, главное, научно доказать герметичность могильника на сроки 10^5-10^6 лет. На уровне современных знаний более доказателен иной подход, при котором допускаются прогнозируемое высвобождение и дисперсия радионуклидов в «пределах ограниченного объема окружающей среды на базе надежного мониторинга и прекрасного понимания существа природных процессов» [51]. Основное требование к вмещающим породам – удержать радионуклиды в заданном горном отводе, а при миграции – поглотить, благодаря своим природным структурно-минералогическим и геохимическим свойствам. Фактически, в течение геологических отрезков времени должны выполняться требования «миграционного» критерия: «физико-химические и геохимические характеристики геологической среды должны ограничивать перенос радионуклидов» [5].

Оценки вмещающей среды входили в критерии выбора площадок уже на начальных этапах поисковых работ. Для формаций Южно-Енисейского кряжа был разработан региональный критерий: «Для регионов с разломно-блоковым строением магматических и метаморфических формаций основным приоритетным требованием при оценке перспективных участков является наличие структурно-тектонических блоков однородных малопроницаемых пород с необходимыми для сооружения хранилища размерами» [11, 12].

На всех дальнейших этапах поиска и выбора перспективных площадок изучались свойства горных пород как среды для изоляции радионуклидов. Лабораторные исследования охватывают широкий спектр физико-механических, минералого-петрографических, радиохимических и других параметров, дающих в итоге оценку барьерных свойств породы по отношению к определенным радионуклидам.

При использовании лабораторных данных возникает известная сложность правомочности переноса результатов исследований даже большого количества, но ограниченных по объему образцов на весь горный массив или его часть. Практика строительства и эксплуатации подземных сооружений показала, что свойства массива не могут быть выведены из суммы свойств отдельных образцов, сколь бы велико не было их количество [57, 60]. Более того, для таких сложных природных систем, какой является геологическая формация и её окружение, характерна большая изменчивость показателей состояния, определяемая не флуктуациями, а самой структурой системы. При этом, помимо пространственной изменчивости свойств пород и массива, для варианта длительного хранения (захоронения) необходимо учитывать изменчивость этих свойств во времени.

Несмотря на известные ограничения, именно лабораторные эксперименты, в широком диапазоне условий их проведения, дают обширную и детальную информацию о барьерных свойствах горных пород. Существуют специальные лабораторные стенды, на которых крупные блоки исследуемых пород проходят испытания в условиях, предельно приближенных к естественным. В то же время в лабораторном опыте можно выделить интересующий нас минерал или структуру и провести эксперимент в строго определенных физико-химических параметрах окружающей среды. Сочетания различных вариантов заданного и легкоуправляемого стендового эксперимента дают не менее существенную информацию, чем натурные испытания. В последних в конечном результате суммируются несколько одновременно идущих сложных геохимических процессов, для выявления значения которых, как правило, проводятся дополнительные лабораторные эксперименты.

Основным количественным показателем барьерных (удерживающих) свойств горных пород является коэффициент распределения K_d, отражающий межфазовое распределение радионуклида и определяемый как отношение его концентраций в твердой и жидкой фазах. При отнесении концентрации радионуклида в твердой фазе к ее массе коэффициент распределения характеризует объемное распределение и имеет размерность $м^3$/кг ($см^3$/г).

На первых этапах поисковых работ (1993-1998 гг.) лабораторные исследования проводились на пробах гранитоидов, отобранных в естественных обнажениях северной части массива [36, 61-64]. Затем для изучения отбирались полученные при бурении скважин пробы кернов, представленные практически всеми фазами и типами пород массива [38, 65-69].

Одним из ключевых параметров, характеризующих среду изоляции, является проницаемость – способность горных пород пропускать через себя жидкости или газы при перепаде давления. Для наиболее монолитных образцов гранитоидов, отобранных на поверхностных обнажениях, величина матричной проницаемости составляет 10^{-19}-10^{-20} $м^2$. По порядку величин эти значения соответствуют гидравлической проводимости 10^{-7} м/сут, или 0,1-0,01 мм/год (для строительства могильника требуемые значения 10^{-7}-10^{-8} м/сут).

Образцы различных типов пород, отобранных при разбуривании скважин (участок Итатский – интервал глубин 65,2-501,7 м, участок Каменный – 131,3-701 м) были переданы для проведения детальных исследований в лабораторию петрофизики и математической геологии НИИ земной коры СПбГУ. Полученные результаты подтвердили низкие значения проницаемости главных типов гранитоидов: от $3{,}7 \cdot 10^{-20}$ до $150 \cdot 10^{-20}$ $м^2$. Пористость исследованных образцов также имеет достаточно низкие значения: от 0,26 до 0,52%. По имеющимся данным следует ожидать, что на глубине проницаемость будет существенно ниже [40, 61]. Величина открытой пористости связана с одним из основных параметров горных пород – удельным электрическим сопротивлением, широко используемым в электроразведочных методах исследования массива [11, 33, 71]. Лабораторные данные подтвердили четкую обратную зависимость удельного электрического сопротивления водонасыщенных образцов от величины открытой пористости.

Низкие значения матричной проницаемости гранитоидов указывают, что доля подземных вод, проникающих через монолитные породы, будет несоизмеримо ниже доли, движущейся по зонам трещин и разломов. Однако в последних, как правило, присутствуют вторичные минералы с высокими сорбционными свойствами.

Дифференциальный термический анализ показал, что для гранодиоритов, включающих до 20% водосодержащих слоистых силикатов (биотит, хлорит), наблюдается их дегидратация при температурах 110-570 ºС. Гамма-облучение образцов дозой до 10^7 Гр увеличивает температуру этого процесса до 550-650 ºС. Общим для гранитов и гранодиоритов является температурный эффект альфа-бета-трансформации кварца при температуре 573 ºС. В этом случае потеря массы образца мала, но переход приводит к изменению объема зерен кварца и последующему уменьшению прочности породы.

Наибольший объем исследований проведен по определению межфазового распределения радионуклидов, фактически – по оценкам удерживающих свойств гранитоидов и миграционным способностям долгоживущих радионуклидов. Условия лабораторных опытов варьировали:

- по составу и структуре пород (лейкограниты, тоналиты, гранодиориты и пр.);

- по состоянию и формам исследуемого материала (образцы с определенной геометрической формой, различные классы дробления пород, отдельные минералы);
- по составу и количествам водной фазы (отношение Т/Ж);
- по времени проведения опытов (дни, месяцы);
- по составу радионуклидов (основной интерес представляют актиноидные элементы – плутоний, америций и нептуний).

Изучение межфазового распределения многовалентных актиноидов в водных системах с близкими к нейтральным областями pH осложнено наличием широкого спектра гидролизных и водных форм этих элементов. Вариации форм нахождения плутония, америция и нептуния приведены в табл. 5 [70].

Таблица 5

Формы нахождения актиноидных элементов в природных водах

Формы нахождения	**Распределение, %**		
	Плутоний	**Америций**	**Нептуний**
Задерживаются ультрафильтром 0,1 мкм	13	89	0,9
Сорбируются на катионите	52	11	20
Сорбируются на анионите	35	0,1	77
Нейтральная форма	0,3	–	3

Эксперименты показали, что основная доля америция и нептуния при pH=3,7-5,5 приходится на формы, которые способны сорбироваться на катионитах. Породообразующие минералы гранитоидов, как известно, обладают в основном катионообменными свойствами.

Сорбционные свойства гранитоидов изучены в статических условиях на монолитных образцах и дробленых пробах с модельными грунтовыми водами, содержащими бикарбонатные ионы, а также с водными вытяжками пород. Результаты определения объемного коэффициента распределения (дробленые пробы) приведены в табл. 6.

Таблица 6

Коэффициенты распределения америция, плутония и нептуния при сорбции на дробленых образцах гранитоидов [65]

Порода	**Глубина отбора, м**	**Коэффициент распределения K_d, $см^3/г$**		
		Америций	**Плутоний**	**Нептуний**
Лейкократовый гранит	513	650	100	0,9
Среднезернистый тоналит	542	680	750	1,5
Крупнозернистый гранодиорит	700	4200	670	< 0,2
Биотитовый гранит	поверхность	1200	900	1,8
Кварцевый диорит	поверхность	800	–	1,4

Коэффициенты распределения америция и плутония при сорбции на гранитоидах Нижнеканского массива достаточно велики, что позволяет предполагать их высокую удерживающую способность относительно данных радионуклидов. Коэффициенты распределения при сорбции пятивалентного нептуния на гранитоидах из бикарбонатсодержащего раствора не превышают 2 см^3/г. Необходимо отметить, что в восстановительных условиях глубоких горизонтов массива нептуний с большей вероятностью может находиться в четырехвалентном состоянии. В этом случае его распределение при сорбции на гранитоидах будет близко к значениям, полученным для четырехвалентного плутония.

На рис. 9 и 10 приведены данные изменения степени сорбции плутония на дробленых образцах лейкогранита и тоналита различной дисперности и при различных соотношениях фаз в зависимости от времени контакта. Равновесное распределение плутония в течение 42 суток не достигается, поэтому в таблице 7 приведены оценочные значения объемного коэффициента распределения.

Различие коэффициентов для различных классов дробления свидетельствует о преимущественном вкладе в межфазовое распределение сорбции плутония на поверхности частиц. Внедрение в поровое пространство минералов за время опыта происходит в незначительной степени. За более длительные интервалы времени реальные значения объемного коэффициента распределения будут значительно выше значений, приведенных в табл. 7.

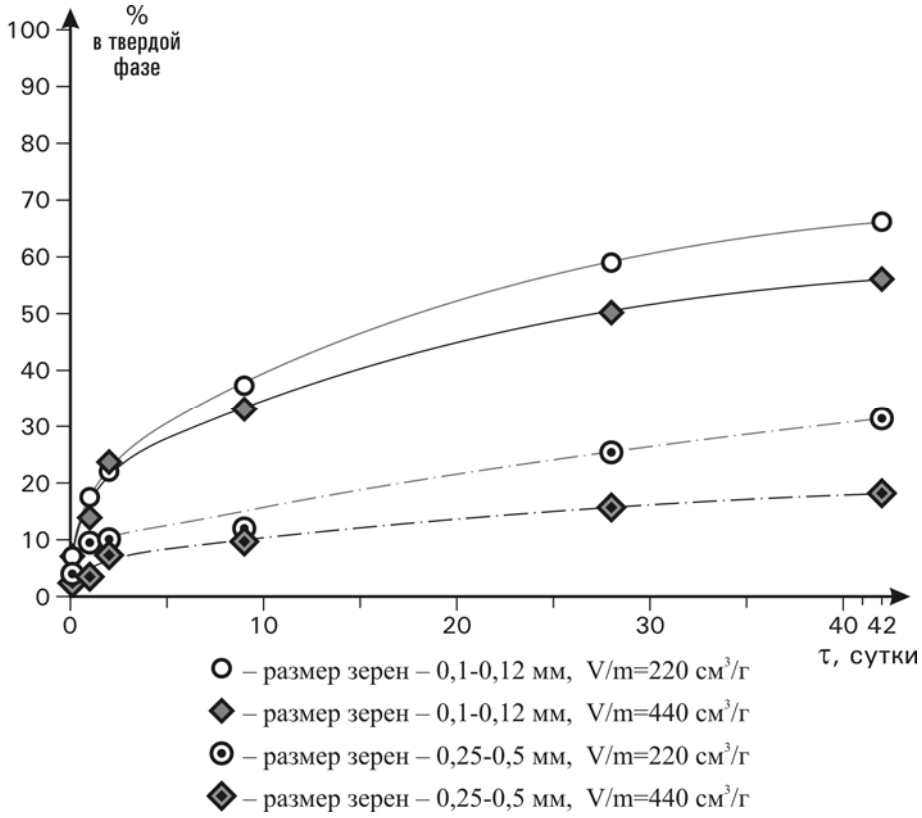
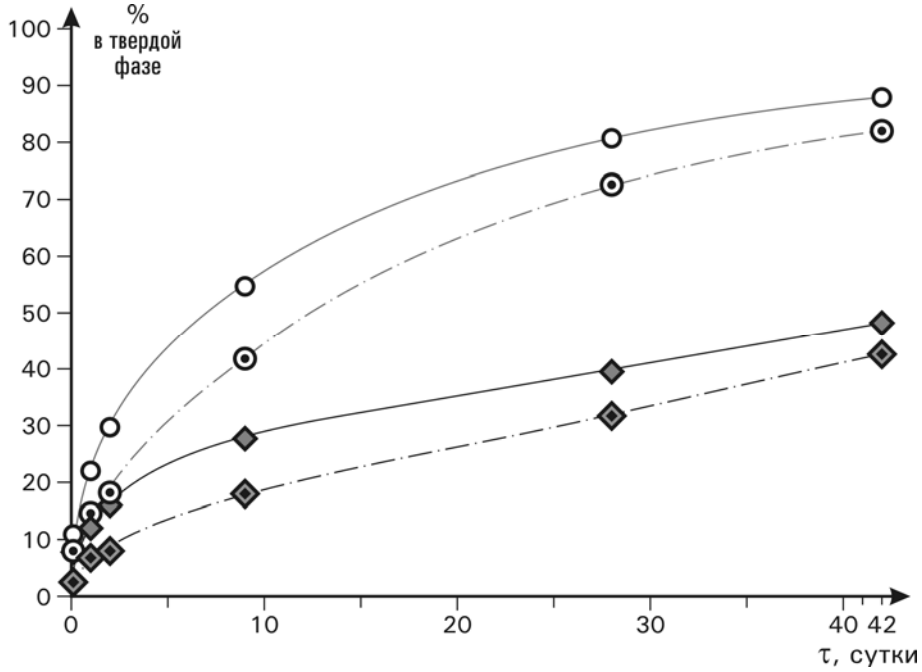


Рис. 9. Зависимость степени сорбции плутония (%) на дробленых образцах лейкократового гранита от времени контакта фаз при различных условиях постановки опытов.



Условные обозначения – см. рис. 9

Рис. 10. Зависимость степени сорбции плутония (%) на дробленых образцах гранодиорита от времени контакта фаз при различных условиях постановки опытов.

Таблица 7

Формальный коэффициент распределения при сорбции плутония на дробленых образцах гранитоидов (контакт 42 суток)

Тип пород	**Соотношение фаз, $см^3/г$**	**Коэффициент распределения K_d, $см^3/г$**	
		Класс 0,25-0,5 мм	**Класс 0,1-0,12 мм**
Лейкогранит	220	100	430
-"-	440	93	560
Тоналит	220	520	790
-"-	440	250	380
Гранодиорит	220	1000	1500
-"-	440	330	430

Аналогичные зависимости степени сорбции наблюдаются и для америция на дроблёных образцах гранитоидов.

При длительных контактах фаз (до 6-ти месяцев) наблюдается необратимое внедрение радионуклидов в структуры минералов. Коэффициент распределения при десорбции всегда выше аналогичного параметра при сорбции (табл. 8).

Таблица 8

Коэффициенты распределения для долгоживущих радионуклидов [67]

Радионуклиды	**Коэффициенты распределения K_d, см^3/г**	
	при сорбции	**при десорбции**
Цезий	$n\cdot10^2$-$n\cdot10^3$	$n\cdot10^3$
Плутоний (IV)	$n\cdot10^2$-$n\cdot10^3$	$n\cdot10^4$
Америций (III)	$n\cdot10^2$-$n\cdot10^3$	$n\cdot10^4$-$n\cdot10^5$
Нептуний (V)	0, n-2	1-2

Перенос актиноидных элементов с мигрирующими подземными водами будет определяться скоростью миграции растворов в ослабленных зонах горного массива. Если принять, что в этих зонах коэффициент фильтрации воды составляет $1\cdot10^{-4}$м/сут, то при гидравлическом градиенте в массиве $3\cdot10^{-3}$-$1\cdot10^{-2}$ м/м и пористости 0,01 действительная скорость миграции в поровом пространстве ослабленных зон составит менее $3\cdot10^{-2}$ м/год. Фактор задержки по имеющимся оценкам составит величины 10^4-10^5. При этих условиях скорость миграции радионуклидов не превысит величину $n\cdot10^{-6}$ м/год, то есть практически за пределы ближней зоны могильника долгоживущие актиноиды не проникнут.

Проведено математическое моделирование дальности распространения нептуния-237 и плутония-239 в водопроводящей зоне с учетом диффузионного рассеивания вдоль неё в монолитный блок пород для широкого диапазона значений эффективной скорости миграции (0,1-10^{-5} м/год). Принимались: пористость пород в зоне водопроводимости – 0,005, вне зоны – 0,001; эффективная скорость миграции растворов – $1\cdot10^{-3}$ м/год и менее. Источник загрязнения находится на внешней границе гидроизолирующего экрана, куда могли проникнуть диффундирующие из матрицы плутоний и нептуний. На внешней границе экрана через 10^5 лет удельное содержание плутония может составить $8\cdot10^{-5}$ от содержания в матрице. Удельное содержание нептуния на границе через 10^6лет – 0,012 от содержания в матрице.

Полученные оценки показали, что через 100 тыс. лет ореол распространения радионуклидов от внешней границы экрана составит десятые доли метра, а их содержание в мигрирующих водах – не более 10^{-4} доли от содержаний на границе экрана. Проведено сопоставление оценок скоростей высвобождения актиноидов из ближней зоны могильника и скоростей их водной миграции по массиву, определены требования по устойчивости матрицы и удерживающим свойствам вмещающих пород. Для концентратов трансплутониевых элементов значения коэффициента диффузии по лимитирующему составляющему – нептунию должны не превышать $1\cdot10^{-17}$ м^2/с. Коэффициент гидравлической проводимости ослабленных водопроводящих зон должен быть не выше $1\cdot10^{-5}$ м/сут, а минералогический состав пород этих зон должен обладать барьерными свойствами с коэффициентами распределения не менее 10 см^3/г.

В табл. 9 представлены результаты оценок скоростей миграции радионуклидов с учетом удерживающих свойств, определенных для образцов гранитоидов с различными параметрами:

	монолитная порода	ослабленная зона
пористость	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-2}$
коэффициент фильтрации	$3 \cdot 10^{-7}$ м/сут	$3 \cdot 10^{-5}$ м/сут
гидравлический градиент	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$
действительная линейная скорость миграции воды	$2 \cdot 10^{-4}$ м/год	$2 \cdot 10^{-2}$ м/год

Таблица 9

Сравнительная оценка миграции радионуклидов для различных зон гранитоидов [67]

Радионуклид	**K_d, см^3/г**	**Скорость миграции, м/год**	
		монолитная порода	**ослабленные зоны**
Цезий	$(5…9) \cdot 10^{2}$	$(4…8) \cdot 10^{-10}$	$(0{,}8…1{,}3) \cdot 10^{-7}$
Плутоний	$(7…9) \cdot 10^{2}$	$(6…8) \cdot 10^{-10}$	$(0{,}8…1) \cdot 10^{-7}$
Америций	$(1{,}3…3{,}4) \cdot 10^{3}$	$(1…3) \cdot 10^{-10}$	$(2…5) \cdot 10^{-8}$
Нептуний	4…28	$(0{,}1…1) \cdot 10^{-8}$	$(0{,}2…2) \cdot 10^{-5}$

Как следует из представленных в таблице 9 данных, скорости миграции радионуклидов чрезвычайно малы даже для ослабленных зон. При скорости миграции нептуния $2 \cdot 10^{-5}$ м/год ореол его распространения по ослабленной зоне за 50 000 лет составит около 1 м.

Дополнительная информация, характеризующая породы массива как среду для изоляции радионуклидов, получена в лаборатории петрофизики и математической геологии НИИ земной коры СПбГУ. Для пород с низкой пористостью наиболее адекватными и информативными оказались методы капиллярной дефектоскопии (колористической пенетрации) и дифференциального водопоглощения [72]. Подтверждена низкая открытая пористость гранитоидов основных фаз внедрения – в среднем 0,5%, при вариациях – от 0,1 до 0,7%. Более высокую пористость имеют породы завершающей жильной фазы: диабазовые порфириты 2,5-3,0%, а микросиениты – до 9,4%. Проведенные комплексные петрофизические исследования показали, что высокие удерживающие свойства гранитоидов относительно радионуклидов объясняются сложной «лабиринтной» конфигурацией межзерновой пористости и интенсивной пелитизацией и серитизацией главных породообразующих минералов – полевых шпатов. Структурные и минералогические особенности гранитоидов, обусловленные проявлением позднемагматических метаморфических процессов, способствовали формированию у гранитоидов массива естественных барьерных функций.

Минералого-петрографические, петрофизические и радиогеохимические исследования гранитоидных пород Нижнеканского массива (участки Итатский и Каменный) установили взаимосвязь особенностей трещинно-порового пространства гранитидов с их высокими удерживающими свойствами относительно радионуклидов. Требования базового геологического критерия, относящегося к барьерным

свойствам вмещающей среды [5], конкретизировано и определено для условий гранитоидных блоков изучаемого массива.

Нижнеканский гранитоидный массив, как и все древнейшие геологические формации, неоднократно подвергался воздействиям более поздних метаморфических процессов. Изменения происходили как по всему объему пород (протоклаз, постмагматический метасоматоз), так и в пределах отдельных линейно-плоскостных структур с образованием зон бластомилонитизации, катаклаза и гидротермально-метасоматической переработки.

Сопоставление и анализ комплексных лабораторных исследований Радиевого института и НИИ земной коры показали, что в основном объеме гранитоидных пород под воздействием постмагматического метаморфизма образуется система трещин и пор сложной объемной конфигурации, содержащая вторичные мелкодисперсные минералы – природные сорбенты. В результате весь объем трещинно-порового пространства этих пород функционирует как структурно-минералогический геохимический барьер, а не как система потенциальных каналов миграции радионуклидов. Природное сочетание в единой структуре породообразующих минералов (полевых шпатов, кварца, слюд, роговой обманки) и небольших количеств вторичных слоистых силикатов обеспечивает достаточно высокую ёмкость гранитоидных пород с различными механизмами удержания радионуклидов (диффузия в минеральный скелет, ионный обмен, сорбция и пр.).

На примере Нижнеканского массива экспериментально подтверждены характерные структурно-минералогические свойства пород серии гранит – сиенит – тоналит – диорит: образование по стенкам каналов миграции водных растворов слоистых силикатов – хлорита, иллита, смектита, способных удержать и поглотить вышедшие за пределы инженерных барьеров радионуклиды. Это геохимическое свойство гранитоидов подтверждает обоснованность рекомендаций их использования в качестве вмещающей среды для изоляции радиоактивных отходов [73].

Наиболее вероятными и заранее предсказуемыми миграционными каналами, близость к которым должна быть исключена на этапе выбора площадок, являются тектонические зоны разломов, трещиноватости, катаклаза, милонитизации и пр. При этом необходимо отметить, что водопроводящие и рассеивающие функции таких структур не всегда преобладают над изоляционно-барьерными. Например, процессы катаклаза минералов могут увеличить их удерживающие свойства относительно техногенных микропримесей [37]. Тектоническое нарушение может функционировать как непроницаемый плоскостной экран, обеспечивающий закрытость геологической структуры (полигон Северный) [74]. Изучение поясов нарушений Нижнеканского массива и определение их роли в качестве структурно-геохимических зон миграции является ключевой задачей дальнейших работ.

4. Основные итоги проведенных исследований

При изучении геологических объектов, предназначенных для сооружения в них подземных комплексов с высокой потенциальной радиационно-экологической опасностью, предусматривается проведение значительных по объему комплексных поэтапных работ, регламентируемых международными рекомендациями и государственными нормативно-правовыми актами [75, 76].

В общую процедуру проводимой деятельности входит определение уровня и достаточности полученной информации для обоснования дальнейших этапов работ. Фактически определяется статус изученности геологического объекта, дающий научно-правовую базу для принятия решений по дальнейшим действиям [67].

Основную информативную базу представляет перечень имеющихся данных, результирующих выполненные этапы и обосновывающих начало нового раздела исследований. По данным изучения Нижнеканского массива в такую базу включены следующие положения и выводы:

1. Южно-Енисейский кряж является стабильной платформенной структурой с завершившимися циклами тектоно-магматического развития и прогнозируемым сохранением режима низкой сейсмичности и плавных вертикальных движений в ближайшем геологическом будущем.
2. Нижнеканский гранитоидный массив выбран в качестве перспективного для дальнейших исследований после анализа и сравнения нескольких региональных структур, геологических формаций и массивов, при использовании основополагающих критериев, альтернативных вариантов и требований безопасности.
3. Гранитоиды являются общепризнанной благоприятной средой для создания подземных комплексов изоляции радиоактивных материалов. Породы гранитной серии являются предметом разносторонних, в том числе натурных, исследований в рамках национальных и международных программ по проблемам изоляции РАО в геологических формациях [77].
4. Нижнеканский массив имеет разломно-блоковую структуру, образованную крупными монолитными блоками пород, разделенными и ограниченными тектоническими разломами. Площадь наиболее перспективных блоков от 1,5 до 9 км^2 при мощности гранитоидов не менее 3 км. Параметры блоков позволяют разместить поверхностные и подземные сооружения хранилища на одной рабочей площадке.
5. В гранитоидных массивах с разломно-блоковой структурой условно однородные монолитные части выделяются в физических полях (гравитационных, магнитных, электромагнитных) по предельно малым коэффициентам неоднородности.
6. Рельеф исследуемого района формировался в течение последних миллионов лет при сохранении на поверхности гранитоидов древних мел-палеогеновых (100-30 млн. лет) кор выветривания. Монолитные блоки пород выделены выровненными водоразделами шириной 3-5 км, которые в сочетании с крутовврезанными речными долинами свидетельствуют об устойчивом неотектоническом поднятии района.
7. По имеющимся данным на территории северной части Нижнеканского массива преобладает инфильтрационный тип гидродинамического режима с нисходящим движением подземных вод от водораздельных участков с последующей разгрузкой в поверхностную гидросистему.
8. Сочетание низкоминерализованных гидрокарбонатно-кальциевых вод с устойчивой ассоциацией глинистых и железосодержащих минералов в приповерхностных частях зоны выветривания гранитоидов создает геохимический барьер миграции радионуклидов.
9. Гранитоиды массива имеют низкую проницаемость и, вследствие наложенной гидротермальной минерализации, обладают высокой удерживающей способностью относительно радионуклидов (цезий, плутоний, америций). Матема-

тическое моделирование миграционных процессов, использующее результаты комплексных лабораторных исследований, оценивает скорости миграции радионуклидов для исследуемых блоков массива в пределах 10^{-5}-10^{-10} м/год. Для наихудшего варианта (миграция нептуния по проницаемым участкам пород) ореол загрязнения недр за 100 тыс. лет ограничивается ближней приконтурной зоной подземного хранилища.

10. Воздымание массива (0,52-0,93 мм/год) при некоторых дифференциальных смещениях отдельных гранитоидных блоков (0,002-0,027 мм/год) существенно не изменит в будущем геоморфологию района и не повлияет на целостность подземного хранилища, созданного в пределах монолитных блоков.
11. Сейсмичность рассматриваемой территории по оценкам ОСР-97 [78] для особо ответственных объектов (карта С) составляет 7 баллов сейсмической шкалы МК-64. Средняя повторяемость землетрясений, превышающих 7 баллов, составляет 5 000 лет. Для глубинных условий массива гранитоидов расчетная сейсмичность снижается на два балла [79].
12. Анализ палеогеографических и палеоклиматических реконструкций исключает на ближайшие десятки тысяч лет экстремальные геоморфологические явления, которые бы нарушили условия подземной изоляции хранилища. За время последних оледенений Западной Сибири территория водораздела Енисей – Кан не покрывалась льдами.
13. Изучение металлогенической специализации гранитоидов массива и статистическая обработка аналитических данных показали, что породы его центральной части на участках Итатский и Каменный неперспективны для промышленного оруденения [35].
14. В районе перспективных участков для сооружения хранилища производственно-хозяйственная деятельность имеет узкопрофилированный характер. Район мало заселен при отсутствии ограничений природопользования.
15. Близость перспективных участков и всей северной части Нижнеканского массива к Горно-химическому комбинату и площадке завода РТ-2, наличие хорошо развитой инфраструктуры г. Железногорска будут способствовать эффективному решению в будущем транспортно-коммуникационных проблем хранилища и социально-экономических вопросов.

Представленный перечень по своей последовательности и содержанию дает ответы на степень соответствия гранитоидов Нижнеканского массива требованиям принятых геологических критериев выбора площадок [4-6]. Одновременно такая информация требуется для выполнения дальнейших этапов исследований и разработки документации предпроектных работ.

В 1999 г. Российская Федерация присоединилась к Международной конвенции о безопасности обращения с отработавшим ядерным топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами [80]. Нормативное регулирование безопасности при обращении с РАО в России базируется на «Концепции формирования структуры системы нормативных документов, регламентирующих обеспечение безопасности при обращении с радиоактивными отходами» [81]. На определенных этапах подготовки проектов разрабатываются «Декларация о намерениях» (ДОН), «Обоснование инвестиций в строительство» (ОБИН), «Положение об оценке воздействия намечаемой хозяйственной деятельности на окружающую среду в Российской Федерации» (ОВОС), разработанное во исполнение Федерального закона «Об экологической экспертизе» и пр.

Наряду с большим объемом научно-технических данных, практически все нормативно-правовые документы включают обеспечение гласности и информирования общественности и населения о проектируемой деятельности и, в первую очередь, о вероятности негативного воздействия на окружающую среду и человека. При этом наиболее болезненно воспринимаются радиационно-экологические проблемы. Кроме того, в печати и на сайтах Интернета появилась «антирадиационная» информация, изобилующая предвзятыми и необъективными суждениями, ложными выводами, вымышленными фактами [82]. В противовес дезинформации необходимы широкое ознакомление не только специалистов, но и широкой общественности с целями и состоянием проблемы подземной изоляции РАО, обсуждение результатов работ на тематических конференциях и симпозиумах, а также активная пропаганда экологической безопасности концепции подземной изоляции РАО.

Исследования Нижнеканского массива являются открытыми работами, направленными на выполнение критериев и правил геоэкологической безопасности. Полученная информация обсуждается и представляется специалистам и общественности, подробно излагается в докладах и публикациях.

Результаты комплексных геологических работ представлены на двух заседаниях Координационного научно-технического совета по научному сопровождению проектирования и строительства завода РТ-2 на ГХК (г. Железногорск, 1995, 2002) [1, 15, 20, 33, 35, 36, 46, 47, 56, 71], на III Российской конференции по радиохимии (Санкт-Петербург, 2000) [2, 64], отдельными публикациями [11, 12, 18].

Результаты изучения массива как среды для изоляции ВАО обсуждались широким кругом учёных и специалистов на международных конференциях и симпозиумах [61-63, 65, 67-69], на Международном геологическом конгрессе в 2000 г. [83].

Международным научно-техническим центром (МНТЦ) приняты и реализованы два проекта (1995-1998 гг., 2001-2004 гг.), по своему содержанию являющиеся научным сопровождением поисковых работ на Южно-Енисейском кряже и Нижнеканском массиве.

В Санкт-Петербурге и Москве проведены семинары и симпозиумы, на которых обсуждались результаты и проблемы исследований Нижнеканского массива (СПбГУ, Государственный региональный образовательный центр (ГРОЦ) Росатома (Санкт-Петербург), Российская академия наук).

Материалы исследований Нижнеканского массива представлены в юбилейном сборнике Радиевого института (1997) и на его сайте в Интернете.

В настоящее время в исследованиях Нижнеканского массива принимают участие 16 научно-исследовательских и специализированных организаций, в том числе НИИ земной коры СПбГУ, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН, Красноярский научно-исследовательский институт геологии и минерального сырья (КНИИГиМС).

Задача поисков геологической формации и площадок для безопасного хранения ВАО и ОЯТ решается в соответствии с Федеральной целевой программой «Обращение с радиоактивными отходами и отработавшими ядерными материалами, их утилизация и захоронение на 1996-2005 годы».

Объем доступной информации о гранитоидах Нижнеканского массива, высокий научно-профессиональный уровень обсуждения результатов проведенных исследований в значительной степени удовлетворяют современным законодательным требованиям открытости проектов с потенциальной экологической опасностью.

В конце 2002 г. Минатом утвердил Декларацию о намерениях строительства подземной исследовательской лаборатории в Нижнеканском гранитоидном массиве (первой очереди пункта подземной изоляции радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива), составленную специалистами Горно-химического комбината, ВНИПИпромтехнологии и НПО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина».

Разработка "Декларации о намерениях" (ДОН) подтвердила достигнутый статус исследования массива как стадию предпроектных научно-исследовательских работ по детальному изучению его перспективных участков [67].

5. Основные нерешенные проблемы

Нижнеканский массив по результатам проведенных исследований является основным и по статусу пока еще единственным для создания в перспективе подземного геологического хранилища. Однако ни сам массив, ни его выбранные участки не изучены в том объеме и детальности, какие требуются для строительства [4, 84].

Реализация дальнейших этапов деятельности выдвигает ряд проблем, для решения которых требуется проведение значительного объема геологоразведочных работ, серийных лабораторных экспериментов и комплексных научных исследований.

На ближайшую перспективу необходимо выделить наиболее существенные направления научных исследований по Нижнеканскому массиву и его перспективным площадкам.

1. Комплексная доразведка массива, ориентированная, в первую очередь, на определение свойств пород массива как среды для длительной изоляции РАО. Это: конфигурация и мощность массива; зоны контактов; структурно-петрологический анализ гранитоидов, проведенный на базе крупномасштабного картирования (1:50 000 – 1:500); выделение зон разломов, трещиноватости, катаклаза с изучением их параметров и функций в общей миграционной системе гранитоидов; гидрогеологические исследования массива с проведением специализированных буровых работ; расширение опробования гранитоидов по площадям и глубине для минералого-петрографических, петрофизических, радиогеохимических, изотопно-геохимических и других лабораторных исследований. Детальная разведка массива требует большого объема дорогостоящих буровых работ, и их выполнение будет определять сроки реализации дальнейших исследований. В значительной степени повышает эффективность разведочных работ привлечение сравнительно малозатратных геофизических методов, использованных для Нижнеканского массива на поисковом этапе [11, 20, 33, 71].

В мировой практике имеются примеры и опыт комплексного изучения перспективных площадок для строительства хранилищ в Швеции, Канаде, США, Франции, Финляндии, Японии и др. [40-42, 77]. В конкретных случаях для получения необходимой информации в изучаемом районе и на отдельных участках разбуривались десятки и сотни исследовательских скважин (Юкка-Маунтин, США; Эспё, Швеция). Необходимо отметить большое значение для принятия решений о вводе в эксплуатацию хранилища результатов отдельных научных исследований. Примером служат изотопно-геохимические данные для газово-жидких включений кальцита из пород Юкка-Маунтин [86]. Для проектирования и строительства подземной лаборатории в гранитоидах Нижнеканского массива разработана специальная программа инженерно-геологических работ, предусматривающая постадийное комплексное изучение перспективного участка [85]. Возможны различные варианты размещения подземной лаборатории и комбинированного комплекса (шахты и скважин) хранилища (рис. 11).

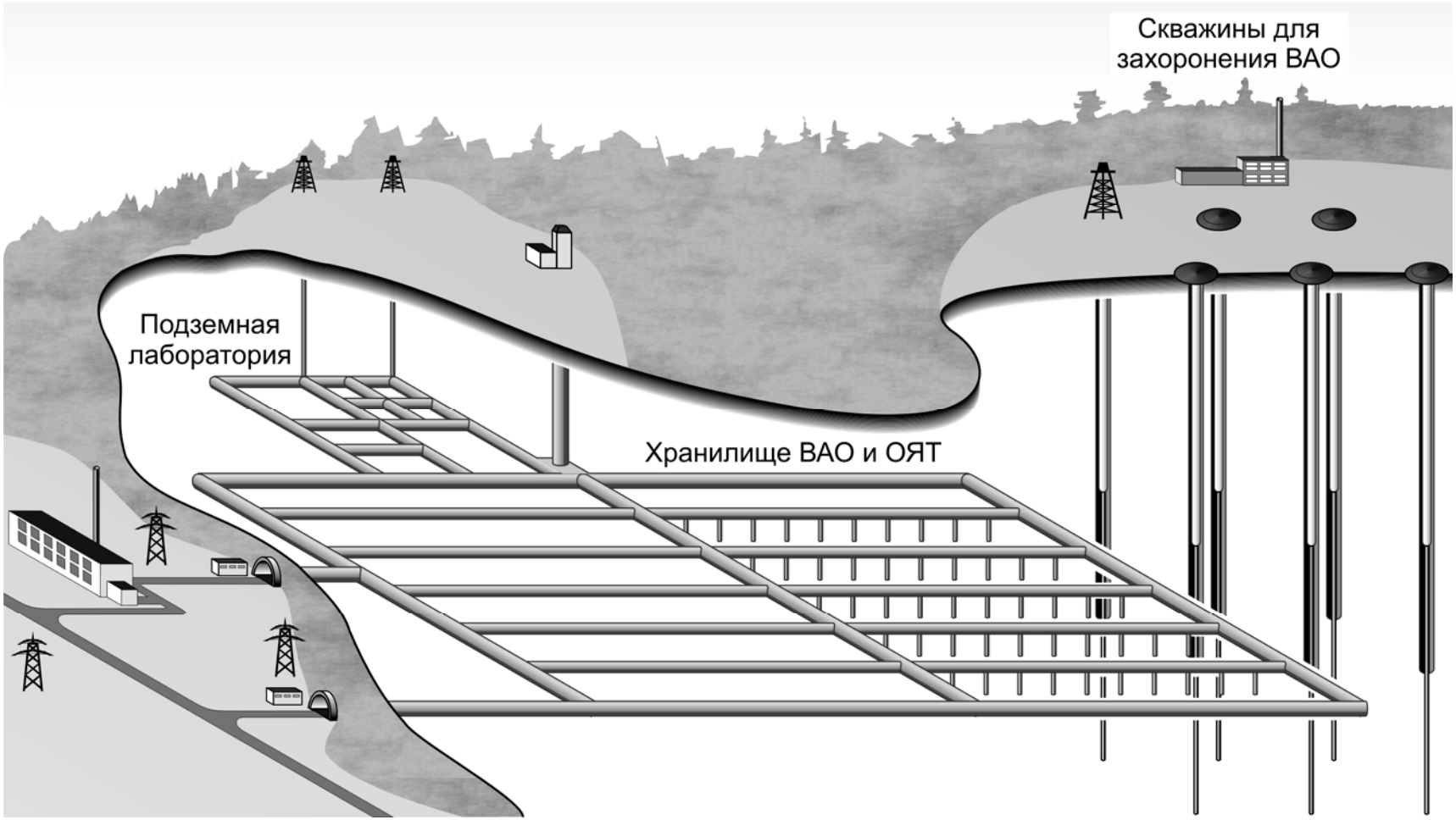


Рис. 11. Вариант компоновки подземного комплекса изоляции ВАО и ОЯТ с начальным объектом строительства – подземной исследовательской лабораторией.

2. Разработка и составление программы научно-исследовательских работ и натурных испытаний в подземной лаборатории

Результаты комплексных исследований в подземной лаборатории дают окончательную оценку пригодности выбранной площадки для безопасной изоляции ОЯТ и ВАО.

За рубежом, где проводятся полномасштабные натурные испытания и более десятка лет функционируют подземные исследовательские лаборатории (ПИЛ), накоплен огромный фактический материал по многочисленным и разнообразным экспериментам, проведенным по национальным или международным целевым программам [77].

Полноценная ПИЛ представляет комплекс подземных сооружений (шахтные стволы, штреки, уклоны и пр.) с системами скважин, разбуриваемых под землей и на поверхности, а также наземными комплексами дистанционных измерений и контроля. Для натурных испытаний используются различные горно-технические, геологические и научно-исследовательские методы изучения природных объектов и геотехнологических комплексов. Разрабатываются специальные программы, обеспечивающие адекватность получаемой информации и её научную обоснованность.

Большой объем методических разработок для натурных исследований горных пород представлен в материалах Международной конференции «Использование подземного пространства страны для повышения безопасности ядерной энергетики», проведенной в 1992 г. Кольским научным центром РАН [87]. Российским ВНИИгеосистем в 2001 г. разработана комплексная программа научно-исследовательских работ геолаборатории на базе сверхглубоких скважин [88].

Для проектируемой ПИЛ в гранитоидах Нижнеканского массива специалистами Радиевого института подготовлена комплексная программа научно-исследовательских работ с широким диапазоном прикладных и теоретических задач: от обеспечения представительности аналитических проб до демонстрации подземного комплекса общественности (табл. 10).

Таблица 10

Проект программы НИР для подземной исследовательской лаборатории Нижнеканского массива гранитоидов

Содержание работ	Ожидаемые результаты
1. Планировка подземных выработок лаборатории для обеспечения представительности изучаемых зон и проводимого пробоотбора	Обеспечение представительности исходных данных
2. Горно-проходческие, геомеханические и физико-химические испытания механизмов, методов и технологии создания подземных выработок и специализированных скважин	Минимизация влияния горных работ на изолирующие свойства горного массива
3. Проведение структурного и микроструктурного анализов блока пород в пределах горных выработок лаборатории и дополнительно разбуренных скважин	Определение структуры и характера анизотропии блока горных пород (присутствие ксенолитов, отдельных фаз, жильных образований)
4. Изотопно-геохимические исследования породообразующих и акцессорных минералов главных типов пород	Исходные данные состояния радиоактивно-радиогенных систем минералов (природных аналогов)
5. Гидрогеологические исследования состава, распределения и режима подземных внутриформационных вод; оценка возможностей и способов управления водными потоками проницаемых зон	Параметры основного механизма миграции – движения радионуклидов с водными потоками

Содержание работ	Ожидаемые результаты
6. Проведение комплексных натурных исследований: геомеханических, радиационно-термических и пр.	Определение влияния изменений пород ближней зоны на условия изоляции ВАО и ОЯТ
7. Разработка композиций инженерных барьеров и проведение натурных испытаний на имитаторах и реальных упаковках РАО	Оценка инженерных барьеров в общей системе хранения и захоронения ОЯТ и ВАО (состав, размещение, сроки функционирования, контроль и пр.)
8. Проведение газовой съемки в выработках лаборатории, трассерные газовые испытания (He, H, CH_4)	Определение газопроницаемости пород, зон трещиноватости, контактных зон и пр.
9. Планировка и создание системы нагнетательно-пробоотборных скважин (с поверхности земли и из подземных выработок лаборатории) для проведения трассерных испытаний. Трассерные испытания крупного блока горных пород с использованием стандартных ксантановых красителей и отдельных изотопов (^{3}H, $^{3,4}He$, ^{82}Br, ^{125}I и др.)	Определение основных параметров системы миграции
10. Моделирование структурно-геохимических зон миграции в пределах литосферного пространства подземной лаборатории (рис. 12). Оценка адекватности результатов натурных испытаний с реальными условиями предполагаемого участка строительства подземного комплекса изоляции ВАО и ОЯТ	Количественные оценки размеров буферной зоны, зоны горного отвода (контролируемой), места и глубины размещения хранилища, скважин захоронения ВАО и т. д.
11. Проведение натурных опытов по миграции радионуклидов в зонах повышенной проницаемости и активных разломов. Корректировка данных влияния тектонической деятельности на условия изоляции. Уточнение тектонического прогноза	Уточненные данные тектонического прогноза условий изоляции
12. Постановка и проведение исследований по определению деформации пород по действием спонтанных и циклических процессов (землетрясения, приливное трение и пр.). Влияние этих деформаций на изменение условий изоляции радионуклидов	Прогноз безопасности изоляции радиоактивных материалов в блоках гранитоидов массива
13. Выбор и использование природных аналогов и циклических процессов для долгосрочного прогноза состояния геотехнологической системы изоляции ВАО и ОЯТ в блоках гранитоидов Нижнеканского массива	Прогноз безопасности подземной изоляции ВАО и ОЯТ
14. Обоснование и выбор системы комплексного мониторинга геотехнологической системы изоляции ВАО и ОЯТ в северной части Нижнеканского массива гранитоидов	Параметры системы мониторинга экологически опасного объекта
15. Обоснование выбора инженерных мероприятий и технических средств, ограничивающих и ликвидирующих развитие негативных процессов в контролируемой системе изоляции радиоактивных материалов	Обеспечение безопасности подземного хранения радиоактивных материалов

Содержание работ	Ожидаемые результаты
16. Комплексный анализ и научное обоснование безопасности комплекса подземной изоляции	Исходные данные для проведения экологической экспертизы строительства подземного комплекса изоляции ВАО и ОЯТ
17. Выбор объектов и составление программы демонстрации безопасности условий изоляции ВАО и ОЯТ	Демонстрационные мероприятия для местной администрации и населения, информация для СМИ.

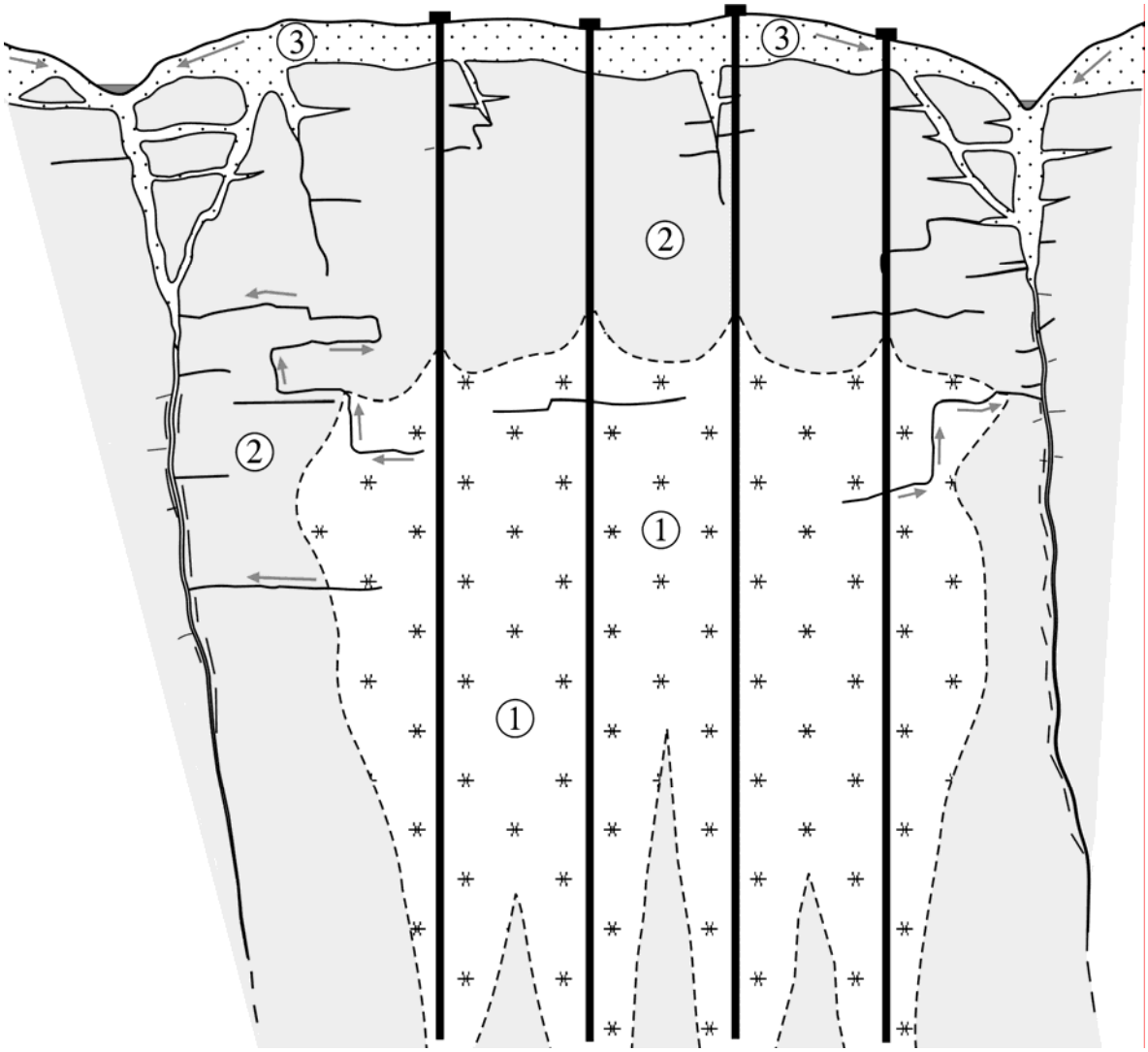


Рис. 12. Принципиальная схема расположения структурно-геохимических зон миграции в блоке гранитоидных пород. Скважинный вариант изоляции РАО:

1 – зона диффузионной миграции;
2 – зона фильтрационной миграции;
3 – зона миграции в пористых средах с минералами – природными сорбентами.

3. Разработка долгосрочного прогноза условий для подземной изоляции РАО

Основная проблема безопасности связана с необходимостью её обеспечения в течение длительных временны́х интервалов. Создаваемые системы изоляции и захоронения должны обеспечить безопасность человека и биосферы на сотни тысяч и более – до миллиона – лет. По геологическим масштабам времени миллион лет – сравнительной небольшой интервал времени в истории развития литосферы и её отдельных структур. Для человеческой цивилизации миллион лет – значительный срок, за который она прошла путь от каменного до атомного века. При составлении долгосрочного прогноза необходимо учитывать вероятность воздействия на подземные хранилища и могильники целого ряда природных, в том числе и маловероятных, событий и процессов.

1) Процессы тектонического развития и формирования рельефа (морфотектогенез)

Современный уровень знаний фундаментальных закономерностей развития Земли позволяет с большой долей вероятности прогнозировать эволюцию глобальных структурных элементов планеты. В течение всей геологической истории Земли прослеживается закономерный переход подвижных геосинклинальных зон с активным тектоно-магматическим режимом к относительно спокойным платформам с низкой тектонической активностью. Длительность геосинклинальных и платформенных этапов эволюции составляет десятки и сотни миллионов лет. Консолидированные платформы образуют крупные литосферные плиты, которые медленно, но постоянно двигаются и разделены между собой активными тектоно-вулканическими зонами. В случае расположения подземного сооружения в пределах платформенной структуры её обычный режим с минимальной сейсмичностью и плавными вертикальными движениями сохранится и через миллион лет. Наше время – завершение активной тектонической эпохи – Альпийской, начавшейся 28 млн. лет назад. За ней следует более спокойный интервал развития земной коры. Фундаментальные закономерности строения и развития литосферы и геологических тел составляют обоснование при выборе мест размещения радиационно-опасных объектов, например в пределах платформенных структур или кристаллических щитов. Критерии выбора площадок требуют также отсутствия разрывных нарушений – природных миграционных каналов. Буквальное его выполнение затруднено, поскольку континентальная (и океаническая) земная кора покрыта сетью планетарной трещиноватости, состоящей из иерархически подчиненных линейных систем, ограничивающих разновеликие блоки горных пород. Шаг между разломами варьирует от 7740 м до 10 км [89]. Кроме того, фундаментальным свойством геологической среды является движение блочных структур различного уровня. Всё это ставит прогноз тектонического развития выбранного для строительства района в разряд ключевых. Наряду с тектоническими факторами на формы рельефа и интенсивность разрушения приповерхностных участков горных массивов влияют климат и его изменения. Таким образом, основными постояннодействующими природными факторами, которые могут изменить условия подземной изоляции РАО, являются тектоника и климат. Характер и параметры воздействия тектонических и климатических факторов прогнозируются на основе анализа палеотектонических событий за последний миллион лет [90]. Для оценки безопасности захоронения РАО из множества прогнозируемых природных процессов и систем выделяется миграционная система: каналы миграции (зоны разломов, трещиноватости и пр.) и среда миграции (проникающие в массив атмосферные осадки).

Вероятность и характер изменений каналов и среды в будущем входят в содержание комплексного прогноза условий изоляции РАО. По прогнозу на 10-130 тыс. лет вперед, составленному Н. В. Лукиной (ГИН РАН), для исследуемого района существенно не изменится средняя скорость тектонических поднятий и смещения по тектоническим разломам, сохранится его расчлененность и геоморфология. В будущем комплекс подземных сооружений будет незначительно подниматься вместе с вмещающим блоком без нарушения монолитности последнего и сохранением целостности хранилища (могильника).

2) Оледенения

Совокупность процессов, сопровождающих материковое оледенение, может деформировать поверхность Земли, увеличить литостатическое и гидростатическое давление, изменить режим и состав подземных вод и, конечно, радикально преобразить климат. Оледенения – характерные явления в истории развития Земли. За последние 2,5 млрд. лет выделены четыре ледниковые эры, состоящие из ледниковых периодов, а каждый период – из большого числа ледниковых эпох. По своей продолжительности эпохи оледенения сопоставимы с теплыми, безлёдными периодами. С начала плейстоцена (1,64 млн. лет назад) 41-тысячелетнее циклическое изменение объемов ледников перешло к 100-тысячной цикличности. Однако даже установленная ритмичность не дает однозначного ответа о сроках оледенений в ближайшем и отдаленном будущем. Изменения климата Земли, развитие оледенений, сопровождающихся существенными изменениями океанического уровня, зависят не только от циклических колебаний солнечной активности, но и от многих других, в том числе галактических и антропогенных факторов [91]. В создавшейся ситуации наиболее целесообразно рассмотреть не само явление оледенения, а его негативное влияние на подземную изоляцию РАО для конкретного района Нижнеканского массива. Вполне очевидно, что все наземные сооружения системы захоронения будут уничтожены оледенением. Подземный комплекс в гранитоидах на глубинах более 300-500 м сохранится, но возможны новые разрывные нарушения блоков, связанные с реакциями тектонических блоков на развитие и деградацию ледниковых покровов; интенсификация наземных и подземных водных потоков при таянии льда и пр. Такие явления могут произойти лишь при покровном оледенении Канско-Енисейского междуречья. Но во время наиболее крупного Зырянского оледенения, в его самой продвинутой на юг ермаковской фазе (аналог ранневалдайской, 70-60 тыс. лет назад) покровные льды доходили по течению р. Енисей лишь до 64^{o} с. ш. [92]. Северная граница Нижнеканского массива на 830 км южнее. Будущее оледенение Западной Сибири не является природным кризисным событием для хранилища глубокого заложения в гранитоидах Нижнеканского массива. Мощность зоны эрозии аналогичных докембрийских гранитоидов Балтийского щита после оледенения не превышала 10 м. Это не исключает негативных влияний на условия подземной изоляции последствий оледенения – изменение режима криогенеза, усиление аллювиальных процессов, ледниковое подпруживание Енисея и пр.

3) Землетрясения

Землетрясения являются одним из природных явлений, сопровождающих геодинамическое развитие Земли. В силу масштабности, внезапности и катастрофических последствий сейсмическая опасность особо выделяется среди других разрушительных событий природного происхождения. Сейсмическая активность тесно связана с тектоническим режимом, и платформенные стабильные структуры не яв-

ляются местами проявления высокобалльных землетрясений. На платформах сейсмические эффекты проявляются от глубокофокусных и далёких литосферных коллизий. Естественно, что близость крупных сейсмоактивных зон и поясов, например Алтае-Саянской орогенической зоны, учитывается при оценках сейсмичности территории, на которой расположен Нижнеканский массив. Если тектоническая активность является постояннодействующим процессом, то сейсмоактивность – явление спорадическое, вероятностное, и, как показывает исторический опыт, труднопредсказуемое. Карта сейсмического районирования 1978 г. оказалась не адекватной реальным сейсмическим событиям, превысившим прогноз на 2-3 балла (Спитакское, Зайсанское, Нефтегорское и другие землетрясения). Новые карты сейсмического районирования территории России составлены в 1997 г. В их числе, для оценки сейсмической опасности мест расположения чрезвычайных объектов (например, АЭС), составлена карта ОСР-97, определяющая районы с очень редкой повторяемостью сотрясений – в среднем один раз в 10 000 лет. Для северной части Нижнеканского массива интервал повторяемости 7-балльных землетрясений составляет 5 тыс. лет. Известны случаи существенного снижения сейсмического воздействия на подземные сооружения в прочных горных породах. Землетрясение 1976 г. в Китае с магнитудой 8,2 по шкале Рихтера полностью разрушило г. Таньшань, погибло 240 тыс. человек. Находившиеся в глубоких шахтах пригородных районов горняки не пострадали и через 2 месяца возобновили работу [93]. Существующая в мире практика антисейсмического строительства позволяет избежать катастрофических последствий сильных землетрясений. Сейсмопрогностические задачи решаются специальными государственными организациями, такими как Геологическая служба США, Бюро сейсмологии Китая, Геологическая служба Японии, Министерство природных ресурсов Российской Федерации и др. В России в 2002 г. завершена разработка специальных геофизических измерений, которые обеспечивают подходы к средне- и краткосрочному прогнозу сильных землетрясений [94]. Существуют геофизические методы контроля состояния геологической среды, дающие возможность долгосрочного (тысячи лет) прогнозирования напряженного состояния горных пород [51]. При достаточном объеме исходных данных и оценках реакций природных сред на техногенное вмешательство (подземный комплекс изоляции РАО) за достаточно продолжительное время наблюдений можно составить прогностическую динамическую модель конкретного участка массива с высокой степенью достоверности её развития в будущем. Неблагоприятный прогноз требует значительного удорожания подземного строительства с упрочнением приконтурных зон выработок, применения сейсмозащиты, использования специальных крепежных и цементирующих материалов.

4) Метеоритная опасность

Вероятность падения крупного метеорита на хранилище ВАО и ОЯТ существует, как бы мала она ни была. В течение года примерно 500 метеоритов величиной 1 см и более достигают поверхности земли. Угрозу для подземных хранилищ РАО представляют только крупные метеориты с определенными параметрами движения, при ударе которых о поверхность Земли образуются крупные кратеры. В результате такого удара изоляция подземного хранилища может быть нарушена или даже произойдет его вскрытие. В околоземном пространстве находится две тысячи крупных астероидов, падение которых может вызвать катастрофические последствия. Средняя вероятность таких мощных импактных событий оценивается как один раз за 50 тыс. лет [90]. Необходимо отметить, что все количественные оценки могут существенным

образом измениться, по мере получения новых данных исследований околоземного пространства. Вероятность разрушения метеоритным ударом какого-либо подземного хранилища или другого экологически опасного объекта (АЭС, химзавод и пр.) даже при частоте падений один раз в 50 000 лет достаточно мала, поскольку на обширной площади поверхности Земли (510 054 000 км^2) необходимо «попасть» в весьма небольшой участок – не более 100 км^2. Естественно, что удар крупного космического тела может привести к катастрофическим событиям не только для какого-либо ядерного комплекса, региона или страны, но и для всей биосферы, включая человечество, в целом. Параметры, механизмы и результаты природного и техногенного ударного воздействия на различные горные породы детально изучены, и эти результаты используются при проектировании и строительстве подземных сооружений [87, 95].

Выделенные природные факторы, определяющие или влияющие на длительное сохранение подземной системы изоляции, существенным образом различаются по характеру своего воздействия и аналитическим методам их прогнозирования. Во временно́м интервале 1 млн. лет тектонические и морфотектонические процессы классифицируются как эволюционные. Климатические изменения имеют четко выраженный циклический характер, дающий возможность эти изменения прогнозировать. Землетрясения и удар метеоритов — явления в значительной степени вероятностные. В существующей практике при оценках безопасности удаления РАО основными показателями являются дозы излучения и риск. Эти параметры не полностью отвечают требованиям норм безопасности для глубокого подземного удаления ядерных отходов, разрабатываемых МАГАТЭ, и требуют дополнений или замены [96]. Кроме того, в нормирующем документе трудно отразить, например, социальные аспекты. При оценках риска необходимо учитывать растущие возможности не только прогнозирования, но и предупреждения катастрофических явлений, даже таких, как удар космического тела [97].

Вместе с составлением прогноза природных явлений для будущего Нижнеканского хранилища (как и для других подземных комплексов изоляции РАО) существует большое число нерешенных вопросов, связанных с техногенной частью системы изоляции, в первую очередь с его инженерно-технологической защитой. Используя метод исторических аналогий, можно предположить, что инженерные барьеры в системах захоронения РАО и ОЯТ могут просуществовать не менее 10 тыс. лет [90]. Однако результаты многофакторного техногенного вмешательства в квазиравновесную природную геологическую систему за такие интервалы времени могут оказаться непредсказуемыми. Неучтенные дестабилизирующие процессы чреваты катастрофическими последствиями.

В число прогнозируемых факторов должны входить:

- последствия микробиологической активности [57, 98];
- источники и возможные негативные эффекты газогенерации [99];
- новые свойства разрушенных и трансформированных инженерных барьеров [100].

По мнению специалистов, вероятность проникновения кого-то, когда-то по ошибке в подземное хранилище сомнительна [96]. Однако угроза несанкционированного вмешательства (терроризма) реально существует.

Наиболее перспективным методом моделирования, а следовательно, и прогнозирования различных экстремальных ситуаций являются геоинформационные системы (ГИС) для конкретной территории или объекта, например для ГХК и северной части Нижнеканского массива [101]. Геоинформационная система представляет

совокупность баз данных в виде соответствующих цифровых карт и программного обеспечения, позволяющего этими данными оперировать. Отдельные картографические материалы, например природные и техногенные радиоактивные аномалии, экзогенные геодинамические явления, могут быть использованы и как документально зафиксированное исходное состояние района будущего строительства.

Собранная с наибольшей полнотой разносторонняя информация может быть использована при разработках концептуальных положений, затрагивающих наиболее сложные разделы всей проблемы удаления радиоактивных материалов в геологические формации [102, 103].

Заключение

Объем информации, полученной в процессе исследований по выбору геологической формации и площадок, позволяет сделать заключение о завершении на Нижнеканском массиве начальных этапов поисково-аналитических работ. Одновременно получена предварительная оценка безопасности условий изоляции в крупных блоках гранитоидных пород. Современный этап разработок может быть охарактеризован как стадия предпроектных научно-исследовательских работ по детальному изучению перспективных участков.

В конце 2002 г. Министерство по атомной энергии утвердило «Декларацию о намерениях строительства подземной исследовательской лаборатории (первой очереди пункта подземной изоляции радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива)». В настоящее время проведено обобщение ранее полученных данных для разработки «Обоснования инвестиций в строительство подземной исследовательской лаборатории в составе хранилища РАО».

Обоснование инвестиций требует сбора, анализа и обобщения всей имеющейся информации по комплексному изучению массива, а также по широкому кругу вопросов для окружающей территории и населения в радиусе 300 км.

Эти же обобщающие материалы являются исходными данными для разработки долгосрочного прогноза условий подземной изоляции радионуклидов в гранитоидных блоках массива. Долгосрочное прогнозирование должно включать многосторонний анализ как фундаментальных закономерностей развития природных процессов и явлений, так и конкретные условия современного состояния исследуемой геологической среды.

Долговременный прогноз миграции радионуклидов невозможен без информации о ряде показателей, характеризующих их подвижность, удержание средой, формы нахождения.

При этом количественные оценки могут быть получены после проведения натурных испытаний в подземной лаборатории. Моделирование различных вариантов изменения миграционной системы, выявление возможных нарушений изолирующих функций подземного хранилища дает основания для принятия превентивных мер, усиления запаса инженерно-технологических возможностей барьеров.

Многолетняя мировая практика показала, что обилие информации о геологической среде, включая натурные испытания, не является решающим фактором для реализации сооружения и эксплуатации подземных хранилищ ВАО и ОЯТ. Основным препятствием для ввода в эксплуатацию комплексов глубокого заложения ВАО и ОЯТ в геологических формациях являются сомнения в оценках безопасности долгосрочных прогнозов. Специалистам приходится постоянно доказывать безопасность подземной изоляции.

Вполне очевидны и не требуют доказательств преимущества подземных сооружений при выполнении антитеррористических требований безопасности.

Комплексные исследования гранитоидов Нижнеканского массива фактически завершили работы начального цикла: выбраны перспективные площадки. Проектирование и строительство подземной лаборатории позволит провести натурные испытания и выбрать оптимальный вариант по созданию инженерно-технологических барьеров. Этот цикл работ завершается принятием инженерных решений по созданию хранилища.

Одновременно должны проводиться исследования по разработке долгосрочного прогноза подземной изоляции, моделирование изменений условий состояния геотехнологической системы на длительные промежутки времени. Обосновываются оценки безопасности удаления РАО.

Таковы перспектива и содержание предстоящих комплексных исследований гранитоидов Нижнеканского массива, единственного пока еще в России природного объекта с максимально высоким статусом подготовки для сооружения подземного хранилища ВАО и ОЯТ.

Список литературы

1. Андерсон Е. Б., Даценко В. М. , Кирко В. И. и др. Результаты комплексных геологических исследований Нижнеканского массива для обоснования возможности его использования для захоронения отвержденных радиоактивных отходов / Сб. : Исследования гранитоидов Нижнеканского массива для захоронения РАО : Материалы КНТС. – СПб., 1999, с. 14-23.
2. Кудинов К. Г., Ревенко Ю. А., Лазарев Л. Н. и др. Современное состояние проблемы завода РТ-2 Горно-химического комбината / III Российская конференция «Радиохимия – 2000». Тезисы докладов. Санкт-Петербург, 28 ноября – 1 декабря 2000 г. – СПб., 2000, с. 9-10.
3. Site Selection Factors for Repositories of Solid High-Level and Alpha-Bearing Wastes in Geological Formations / IAEA TR Series No 77, 1977.
4. Site Investigations for Repositories for Solid Radioactive Wastes in Deep Continental Geological Formations / IAEA TR Series No 15, 1982.
5. Criteria for Underground Disposal of Solid Radioactive Wastes / IAEA Safety Series No 60, 1983.
6. Принципы безопасности и технические критерии для подземного захоронения радиоактивных отходов высокого уровня активности / МАГАТЭ. Серия безопасности, № 99. – Вена, 1990.
7. Смирнов В. И. Геологические основы поисков и разведок рудных месторождений. М. : МГУ, 1954. – 546 с.
8. Санитарные правила обращения с радиоактивными отходами (СПОРО-85) / СанПиН 42-129-11-3938-85. – М., 1986.
9. Чечель Э. И., Машович Я. Г., Гилев Ю. Г. Закономерности строения соленосных отложений кембрия юга Сибирской платформы. М. : Недра, 1977. – 144 с.
10. Жарков М. А., Машович Я. Г., Чечель Э. И. Взаимоотношение соленосной и перекрывающей её красноцветной формации кембрия на юге Сибирской платформы. Новосибирск : Наука, 1982. – 128 с.
11. Андерсон Е. Б., Любцева Е. Ф., Оганезов А. В. и др. Геофизические исследования Енисейского кряжа с целью поисков участков захоронения ВАО / Разведка и охрана недр, 1999, № 9-10, с. 61-63.

12. Андерсон Е. Б., Савоненков В. Г., Шабалев С. И. Разработка геологической концепции и геологических критериев захоронения радиоактивных отходов в гранитоидных формациях (на примере Нижнеканского массива Енисейского кряжа) : Препринт РИ-225. – М. : ЦНИИатоминформ, 2000. – 28 с.
13. Ножкин А. Д., Сумин А. В., Малышев В. И. и др. Геохронологические исследования метаморфических комплексов юго-западной части Сибирской платформы / Геология и геофизика, 1989, № 1, с. 26-34.
14. Зверев А. Б. Результаты натурных исследований устойчивости камерных сооружений подземной атомной станции / Материалы Международной конференции «Использование подземного пространства страны для повышения безопасности ядерной энергетики». Часть 2. 20-22 октября 1992 г., г. Апатиты : Кольский НЦ РАН. – Апатиты, 1995, с.150-163.
15. Гупало Т. А., Спешилов С. Л., Третьяков А. А. и др. Использование комплекса подземных сооружений Красноярского горно-химического комбината в качестве действующей лаборатории для обоснования безопасности хранилища РАО на Нижнеканском массиве / Материалы КНТС по проектированию и строительству завода РТ-2. 20-24 мая 2002 г., г. Железногорск. – СПб., 2004, с. 130-145.
16. Бибикова Е. В., Грачева Т. В., Макаров В. А. и др. Возрастные рубежи в геологической эволюции раннего кембрия Енисейского кряжа / Стратиграфия. Геологическая корреляция, 1993, т. 1, № 1, с. 35-40.
17. Бибикова Е. В., Грачева Т. В., Козаков И. К. и др. Уран-свинцовый возраст гиперстеновых гранитов (кузеевитов) Ангаро-Канского выступа / Геология и геофизика, 2001, т. 42, № 5, с. 864-867.
18. Даценко В. М. Нижнеканский массив – эталон Нижнеканского комплекса (Енисейский кряж). Новосибирск : СНИИГГиМС, 1995. – 122 с.
19. Волобуев М. И., Зыков С. И., Ступникова Н. И. Интерпретация значений абсолютного возраста породообразующих и акцессорных минералов Енисейского кряжа и Восточного Саяна / Новые данные по геологии юга Красноярского края. – Красноярск, 1964, с. 272-294.
20. Линд Э. Н., Даценко В. М., Жура В. М. и др. Состав, физические свойства пород Нижнеканского массива и результаты геофизических работ как основа для составления геологической карты участков Итатский и Каменный / Материалы КНТС по проектированию и строительству завода РТ-2. 20-24 мая 2002 г., г. Железногорск. – СПб., 2004, с. 98-108.
21. Волобуев М. И., Зыков С. И., Ступникова Н. И. К геохронологии Енисейско-Восточно-Саянской складчатой области / Труды XV сессии Комиссии по определению абсолютного возраста геологических формаций.– М. : Наука, 1970, с. 85-106.
22. Волобуев М. И., Зыков С. И., Ступникова Н. И. Геохронология докембрийских формаций Саяно-Енисейского региона Сибири / Актуальные вопросы современной геохронологии. – М. : Наука, 1976, с. 96-123.
23. Ножкин А. Д., Туркина О. М., Бибикова Е. В. и др. Рифейские гранитогнейсовые купола Енисейского кряжа: геологическое строение и U-Pb изотопный возраст / Геология и геофизика, 1999, т. 40, № 9, с. 1305-1313.
24. Верниковский В. А., Верниковская А. Е., Черных А. И. и др. Порожнинские гранитоиды Приенисейского офиолитового пояса – индикаторы неопротерозойских событий на Енисейском кряже / ДАН, 2001, т. 381, № 6, с. 806-810.

25. Верниковский В. А., Верниковская А. Е., Сальникова Е. Б. и др. Новые уран-свинцовые данные возраста формирования палеоостроводужного комплекса Предивинского террейна Енисейского кряжа / Геология и геофизика, 1999, т. 40, № 2, с. 255-259.
26. Ножкин А. Д., Туркина О. М., Бибикова Е. В. и др. Состав, строение и условия формирования метаосадочно-вулканогенных комплексов Канского зеленокаменного пояса / Геология и геофизика, 2001, т.42, № 7, с. 1058-1078.
27. Буслов М. М., Ватанабе Т., Смирнова Л. В. и др. Роль сдвигов в позднепалеозойской-раннемезозойской тектонике и геодинамике Алтае-Саянской и Восточно-Казахстанской складчатых областей / Геология и геофизика, 2003, т. 44, № 1-2, с. 49-75.
28. Лукина Н. В. Активные разломы зоны сочленения Сибирской платформы и Алтае-Саянской орогенической области / Бюллетень московского общества испытателей природы. Отд. геологическое, 1996, т. 71, вып. 5, с. 25-32.
29. Дучков А. Д., Соколова Л. С. Термическая структура литосферы Сибирской платформы / Геология и геофизика, 1997, т. 38, № 2, с. 494-503.
30. Черкасов С. В. Глубинное строение Енисейского кряжа и распределение золотого оруденения / ДАН, 1999, т. 368, № 4, с. 522-524.
31. Мусатов Д. И., Мальцев Ю. И. Геологическое развитие и основные черты металлогении складчатых областей Южной Сибири в свете новой глобальной тектоники / Металлогения и новая глобальная тектоника. Л. : ВСЕГЕИ, 1973, с. 85-89.
32. Гребенщикова В. И., Коваль П. В., Лустенберг Э. Е. и др. Гранитоидные батолиты: структурирование и обработка информации, сравнительная характеристика / Геология и геофизика, 1999, т. 40, № 8, с. 1215-1227.
33. Любцева Е. Ф., Алексеев Е. П., Беляков В. И. и др. Обоснование пригодности гранитоидов участка Каменный для захоронения отвержденных РАО по результатам комплексной интерпретации электро-, магнито- и гравиразведочных данных / Материалы КНТС по проектированию и строительству завода РТ-2. 20-24 мая 2002 г., г. Железногорск. – СПб., 2004, с. 146-154.
34. Попов Н. В. Тектоническая модель раннедокембрийской эволюции Южно-Енисейского кряжа / Геология и геофизика, 2001, т. 42, № 7, с. 1028-1041.
35. Даценко В. М., Линд Э. Н., Андреева Л. П. К вопросу о рудоносности Нижнеканского массива (данные детальных работ на участках Каменный и Итатский) / Материалы КНТС по проектированию и строительству завода РТ-2. 20-24 мая 2002 г., г. Железногорск. – СПб., 2004, с. 94-97.
36. Рогозин Ю. М., Брызгалова Р. В., Смирнова Е. А. и др. Радиохимические аспекты обоснования локализации радионуклидов при захоронении РАО в глубокозалегающие гранитоиды Нижнеканского массива / Сб. : Исследования гранитоидов Нижнеканского массива для захоронения РАО. Материалы КНТС. – СПб., 1999, с. 91-101.
37. Таусон В. Л., Акимов В. В. Использование структурно-несовершенных кристаллов для связывания элементов техногенных геохимических сред / Атомная энергия, 1992, т. 72, вып. 3, с. 251-255.
38. Shabalev S. I., Anderson E. B., Savonenkov V. G. et al. Laboratory Characterization of Rock Specimen from the Nizhnekanskiy Massif (Potential Site for HLW Final Disposal in Middle Siberia, Russia) / Proc. 9th Intern. High-level Radioactive Waste Management conf. «IHLRWM», Las Vegas, USA, 2001, CD-ISBN50-89448-654-3.

39. Савоненков В. Г., Кривохатский А. С. Локализация радиоактивных продуктов (отходов) в соляном куполе АЗГИР : Препринт РИ-235. – М. : ЦНИИатоминформ, 1993. – 48 с.
40. PAGIS – Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste: Summary. Luxembourg, CEC, 1988. – 270 p.
41. Research and Development on Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste / First Progress Report. PNC, Japan, 1992.
42. Field Tracer Experiments: Role in the Prediction of Radionuclide Migration. / NEA/EC GEOTRAP Workshop. Cologne, Germany, 1996. – 256 p.
43. Родионов В. Н. Сейсмический режим и блочное строение земной коры / Геоэкология, 1994, № 3, с. 76-81.
44. Адушкин В. В., Локтев Д. Н., Спивак А. А. и др. Геодинамические факторы при обеспечении долговременной безопасности захоронения радиоактивных отходов / Вопросы радиационной безопасности, 1996, № 1, с. 3-18.
45. Мигурский А. В., Старосельцев В. С. Зоны разломов – естественные насосы природных флюидов / Отечественная геология, 2000, № 1, с. 56-59.
46. Лукина Н. В. Нижнеканский гранитоидный массив: новейшие и современные тектонические движения, морфология и кинематика активных разломов и мегатрещин, современное поле напряжений. Возможности безопасного захоронения ВАО / Сб. : Исследования гранитоидов Нижнеканского массива для захоронения РАО. Материалы КНТС. – СПб., 1999, с. 49-59.
47. Андерсон Е. Б., Савоненков В. Г., Шабалев С. И. и др. Состояние работ по поиску участков для безопасного захоронения отвержденных высокоактивных отходов ГХК и завода РТ-2 / Материалы КНТС по проектированию и строительству завода РТ-2. 20-24 мая 2002 г., г. Железногорск. – СПб., 2004, с. 72-79.
48. Малышев Б. И. Некоторые физико-химические аспекты трещинообразования / Изв. АН СССР. Сер. геологическая, 1991, № 11, с. 152-156.
49. Шабалин Л. И. Роль пористости и проницаемости пород в формировании метасоматической зональности / Изв. вузов. Геология и разведка, 1992, № 4, с. 62-65.
50. Кедровский О. Л., Шищиц И. Ю. Натурные исследования по проблеме захоронения радиоактивных отходов в геологических формациях (по материалам зарубежных публикаций). М. : ВНИПИпромтехнологии, 1992. – 161 с.
51. Аниколенко В. А. К вопросу выбора мест для создания хранилищ радиоактивных отходов в геологических формациях и контроля долговременной стабильности вмещающих горных пород / Вопросы радиационной безопасности, 1998, № 2, с. 11-21.
52. Вартанян Г. С. Геодинамический мониторинг и прогноз сильных землетрясений / Отечественная геология, 2002, № 2, с. 59-63.
53. Уломов В. И. Сейсмическая опасность на территории России / Наука в России, 2001, № 6, с. 18-25.
54. Debating Yucca Mountain / Nuclear Engineering International, 2001, v. 46, № 64, p. 26-29.
55. Ядерный топливный цикл за рубежом. М. : ЦНИИатоминформ, 2000. – 160 с.
56. Миловидов В. Л. Оценка инженерно-геологических условий Нижнеканского массива для сооружения могильника РАО / Сб. : Исследования гранитоидов Нижнеканского массива для захоронения РАО : Материалы КНТС. – СПб., 1999, с. 65-73.

57. Шарафутдинов Р. Б., Строганов А. А., Левин А. Г. и др. Геолого-геохимические аспекты захоронения радиоактивных отходов / Научные и технические аспекты охраны окружающей среды, 1999, вып. 5, с. 2-91.
58. Крайнов С. Р., Рыженко Б. Н. Моделирование геохимических процессов в системе гранит – вода с летучими аниогенными (хлор, сера, углерод) компонентами в связи с дискуссионными вопросами геохимии термальных подземных вод / Геохимия, 1996, № 3, с. 228-241.
59. Крайнов С. Р., Рыженко Б. Н. Анализ проблемы происхождения хлоридных подземных вод и рассолов в массивах кристаллических пород методами термодинамического моделирования геохимических процессов в системе гранит – вода / Геохимия, 1997, № 10, с. 1035-1057.
60. Швецов П. Ф., Зильберброд А. Ф., Паперное М. М. Подземное пространство и его освоение. М. : Наука, 1992. – 196 с.
61. Anderson E. B., Shabalev S. I., Savonenkov V. G. et al. Investigation of the Nizhnekanskiy Granitoid Massif (Middle Siberia, Russia) as a Promising Site for Deep Geological Disposal of HLW. / Proc. Int. Conf. Disposal Technologies and Concepts 1998 («DisTec98»). Hamburg, Germany, Sept. 9-10, 1998, p. 105-110.
62. Anderson E. B., Savonenkov V. G., Shabalev S. I. et al. Complex geological investigations to select a site for high-level waste disposal in the Krasnoyarsk Region (Russia). / NATO ASI Series, Ed. by M. J. Stenhouse and V. I. Kirko. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Netherlands, 1998, p. 135-141.
63. Anderson E. B., Shabalev S. I., Savonenkov V. G. et al. Investigation of the Nizhnekanskiy Granitoid Massif (Middle Siberia, Russia) as a Promising Territory for Deep Geological Disposal of HLW / Results of Pre-Exploration Stages of the Work. Symp. Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXII (WM XXII), Proc. 1999, v. 556, p. 543-550.
64. Андерсон Е. Б., Рогозин Ю. М., Брызгалова Р. В. и др. Сорбционно-барьерные свойства гранитоидов и метавулканитов относительно актиноидов / III Российская конференция «Радиохимия-2000». Тезисы докладов. Санкт-Петербург, 28 ноября – 1 декабря 2000 г. – СПб., 2000, с. 190-191.
65. Anderson E. B., Rogozin Yu. M., Bryzgalova R. V. et al. Experimental Investigation of Sorption-Barrier Properties of Granitoids of the Nizhnekanskiy Massif / Int. Conf. Material Research Society (MRS'2000), 27-31 August 2000, Sydney, 2000 (on CD).
66. Anderson E. B., Savonenkov V. G., Shabalev S. I. et al. Russias proposed geological repository / Nucl. Engin. International, v. 46, № 68, p. 12-13, November 2001.
67. Anderson E. B., Rimski-Korsakov A. A., Savonenkov V. G. et al. Status of the Nizhnekanskiy Granitoid Massif as a Candidate for HLW Deep Geological Repository in Russia. / Sim. HLW, LLW, Mixed Wastes and Environmental Restoration (WM'02), Sucson, USA, 2002, Abstr. 77.
68. Anderson E. B., Rogozin Yu. M., Bryzgalova R. V. et al. Environmental radiation safety insurance for high-level waste repository in granitoids of the Nizhnekanskiy massif (Middle Siberia, Russia). / 7th Int. Sym. «Natural Radiation Environment», Rhodos, Greece, 2002, p. 160-161.
69. Anderson E. B., Rogozin Yu. M., Bryzgalova R. V. et al. Migration features of technogenous radionuclides in granitoid rocks. / Int. Conf. «Radioactivity in the Environment», Monaco, 2002, (on CD).

70. Murray C. N., Stanners D. A., Avogadro A. et al. Effect of long-term release of plutonium and americium into an estuarine/coastal sea ecosistem. / IAEA-SM-257/74, Vienna, 1982.
71. Любцева Е. Ф., Алексеев Е. П., Булдаков М. В. и др. Результаты работ методом аудимагнитотеллурического зондирования на участках Итатский и Каменный /Сб. : Исследования гранитоидов Нижнеканского массива для захоронения РАО. Материалы КНТС. – СПб., 1999, с. 24-34.
72. Прияткин А. А., Поляков Е. Е. Петрофизические методы исследования горных пород. Л. : ЛГУ, 1983. –113 с.
73. Concepts and Examples of Safety Analyses for Radioactive Waste Repositories in Continental Geological Formations / EAEA Safety Series № 8, 1983.
74. Кудинов К. Г., Сигаев Б. П., Рыбальченко А. И. Научные и технические проблемы продления сроков эксплуатации полигона Северный / Сб. : Исследования гранитоидов Нижнеканского массива для захоронения РАО. Материалы КНТС. – СПб., 1999, с. 131-136.
75. Делаттр Доменик. Обновление НБРО. Программа по нормам безопасности обращения с радиоактивными отходами / Бюлл. МАГАТЭ, том 42, № 3, 2000, с. 30-34.
76. Шарафутдинов Р. Б. Некоторые аспекты системного подхода к нормативному регулированию безопасности при обращении с радиоактивными отходами / Вопросы радиационной безопасности, 2002, № 2, с. 3-20.
77. Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation / Third Worldwide Review. Ed. P. A. Witherspoon, G. S. Bodvarsson, Earth Sciences Division USA, 2001. – 355 p.
78. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации (ОСР-97) / ОПФЗ РАН, 1998.
79. СНиПП-7-81. Строительство в сейсмических районах. М. : Стройиздат, 1982.
80. Объединенная конвенция о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами / Вена : МАГАТЭ, INFCIRC/546, 1997.
81. Ковалев Е. Е., Хрущ В. Т., Чухин С. Г. и др. Концепция формирования структуры системы нормативных документов, регламентирующих обеспечение безопасности при обращении с радиоактивными отходами / Атомная энергия, 1998, т. 84, вып. 4, с. 369-378.
82. Арутюнян Р. В., Кочетков О. А., Линге И. И. и др. Радиологические мифы и реалии / Бюллетень по атомной энергии, 2001, № 5, с. 65-66.
83. Anderson E. B., Shabalev S. I., Savonenkov V. G. et al. Nizhnekanskiy Granitoid Massif (Middle Siberia, Russia) as a Potential Site for HLW Disposal. / Report at 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro, Brazil, 2000. CS 31st International Geological Congress, Abstract Volume.
84. Шищиц И. Ю. Основы инженерной георадиоэкологии / Научные и технические аспекты охраны окружающей среды, 1999, № 3, с. 64-116.
85. Гупало Т. А., Прокопова О. А., Миловидов В. Л. Комплексная программа инженерно-геологических изысканий для проектирования и строительства подземной лаборатории / Материалы КНТС по проектированию и строительству завода РТ-2. 20-24 мая 2002, г. Железногорск. – СПб., 2004, с. 116-125.

86. Neymark L. A., Amelin Yu. V., Paces J. B. et al. Age Constraints on Fluid Inclusions in Calcite at Yucca Mountain. / Proc. 9th Intern. High-level Radioact. Waste Management Conf. Las Vegas, USA, 2001, CD-ISBN50-89448-654-3.
87. Использование подземного пространства страны для повышения безопасности ядерной энергетики. Части 1 – 3 / Материалы Международной конференции. – Апатиты, 1995.
88. Зайченко В. Ю. Тюменская сверхглубокая скважина – геолаборатория нового типа / Отечественная геология, 2001, № 4, с. 14-24.
89. Голубев В. М. Основы общей космодинамики геосферы и биосферы / Отечественная геология, 1992, № 9, с. 79-84.
90. Калиберда И. В., Левин А. Г., Мурлис Д. В. и др. Внешние воздействия природного происхождения на глубинные захоронения долгоживущих радиоактивных отходов / Атомная техника за рубежом, 2003, № 2, с. 3-7.
91. Чумаков Н. М. Общая направленность климатических изменений на Земле за последние 3 миллиарда лет / ДАН, 2001, т. 381, № 5, с. 652-655.
92. Архипов С. А. Главные геологические события позднего плейстоцена (Западная Сибирь) / Геология и геофизика, 2000, т. 41, № 6, с. 792-799.
93. Уолтхем Т. Катастрофы. Неистовая Земля. Л. : Недра, 1982. – 223 с.
94. Вартанян Г. С. Геодинамический мониторинг и прогноз сильных землетрясений / Отечественная геология, 2002, № 2, с. 59-63.
95. Shock metamorphism of natural materials / The 1st Conf. NASA, Baltimore, 1966. – 927 p.
96. Проект норм безопасности для геологического удаления ядерных отходов / Информационный бюллетень «Ядерная и радиационная безопасность России», 2002, вып. 2 (5), с. 121-125.
97. Битков В., Левченок Н. Есть ли будущее у ядерных взрывных технологий? / Бюллетень ЦОИ, 2000 г., № 1, с. 12-14.
98. Еремеева А. А. Инженерно-геологические и геоэкологические аспекты захоронения радиоактивных отходов в нижнекембрийских синих глинах Ленинградской области / Материалы молодежной конференции “Современные вопросы геологии”. – М. : Научный мир, 2002, с. 374-377.
99. Рогозин Ю. М., Алексеев В. А., Брызгалова Р. В. и др. Газогенерация при радиационно-тепловых нагрузках на конструкционные материалы в хранилищах отвержденных высокоактивных отходов в слабопроницаемых скальных породах / Радиохимия, 1996, т. 38, вып. 6, с. 563-565.
100. Бобров Ю. Г., Моторный А. В., Костиков Ю. П. и др. Анализ коррозионных отложений при гидротермальном окислении стали / Атомная энергия, 1988, т. 64, вып. 2, с. 99-103.
101. Варфоломеев И. В., Мальцев Ю. М., Лопатин А. П. и др. ГИС – зона наблюдений ГХК – как информационная основа для разработки ОВОСа и ведения радиоэкологического мониторинга / Сб. : Исследования гранитоидов Нижнеканского массива для захоронения РАО : Материалы КНТС. – СПб., 1999, с. 60.
102. Rethinking High-Level Radioactive waste Disposal / National Academy Press. Washington, D. C., 1990. – 38 p.
103. Disposition of High-Level Waste and Spent Nuclear Fuel. / National Academy Press. Washington, D. C., 2001. – 198 p.

The results of prospecting and scientific works on site selection to geological disposal of HLW and SNF in the Nizhnekanskiy granitoid massif (South Yenisei Ridge)

E. B. Anderson, V. G. Savonenkov, E. F. Lyubtseva, Yu. M. Rogozin, S. I. Shabalev, N. L. Alexeev

Investigations on selection of geological formation and sites aimed to create an underground geological repository for high-level radioactive waste (HLW) and spent nuclear fuel (SNF) isolation accumulated by the Mining-Chemical Combine (MCC, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Land) was started in 1993 following the directive of Russian Ministry of Atomic Energy (Minatom). The scientific team curried out investigations involved scientist from institution of Minatom, the Russian Academy of Science, St. Petersburg and Krasnoyarsk Universities as well as geological organsations of Krasnoyarsk Land. The V. G. Khlopin Radium Institute has been a scientific supervisor and coordinator of the research.

The research began with survey of regional geological structures such as Siberian Platform, West-Siberian Plate and Altay-Sayan Fold Belt. On the base of complex interpretation of geological, tectonic, seismic data and nature management social-economic information these have lead to the selection of old magmatic and metamorphic formations of South Yenisei Ridge.

The most perspective sites have been selected within the South Yenisey Ridge. These involved the northern part of Nizhnekanskiy granitoid massif, which is one of the most large granite massif in the Middle Siberia. Investigations curried out on the massif allowed to select two most perspective sites: Itatskiy and Kamennyi of 15-20 km^2 each. They are located 25-30 km away from MCC.

Available geological, geophysical, tectonic, hydrogeological data etc. strongly suggest that the selected sites fit the requirements of safe disposal of radioactive waste. Investigations of mineralogical and geochemical properties of the granites curried out in Radium Institute have shown that the rocks are able to retard and assimilate such radionuclides as cesium, americium and plutonium. Accordingly to calculations, during the long-term migration the nuclides will not leave the near field of repository.

The analysis of regional tectonic development and paleoclimate reconstructions do not suggest any environmental collision, which may affect negatively on the isolation conditions.

All the data suggest the requirements of further detailed preproject investigations aimed to create an underground research laboratory and to provide the preliminary assessment of repository impact on the environment. It is necessary to continue the complex geological research and prospecting works on the perspective sites in order to prove the creation of underground repository of HLW.

Taking into account the volume of carried out investigation the perspective sites on the Nizhnekanskiy massif are first and most possible candidates to realize the concept of Minatom on the creation of regional HLW repositories in the Russian Federation.

Перспективы создания подземных могильников РАО в нижнекембрийских глинах Ленинградской области

Е. Б. Андерсон, В. Г. Савоненков, С. И. Шабалев

Создание современного пункта захоронения радиоактивных отходов является важнейшим условием для развития промышленности и обеспечения радиационной безопасности в Ленинградской области.

Обобщены данные по нижнекембрийским глинам юго-западной части Ленинградской области как потенциальной формации для удаления радиоактивных отходов Северо-Западного региона Российской Федерации.

Рассмотрены физико-географические, социально-экономические, геологические, тектонические и другие характеристики Ленинградской области.

Подтверждены сделанные ранее выводы о перспективности пласта нижнекембрийских глин для строительства регионального хранилища радиоактивных материалов.

Определены основные ближайшие задачи по изучению и оценке пригодности формации как среды для строительства хранилища РАО.

Введение

Северо-Западный регион (СЗР) – один из крупнейших экономических регионов Российской Федерации и одновременно наиболее насыщенный предприятиями и объектами, использующими радиоактивные материалы. Здесь расположены Ленинградская АЭС с 4-мя блоками реакторов РБМК-1000, Кольская АЭС с 4-мя блоками реакторов ВВЭР-440, базируются атомный ледокольный флот и Северный военно-морской флот с ядерными энергетическими установками и ядерным оружием, размещены судостроительные и судоремонтные заводы с ядерно-энергетическими установками. В Санкт-Петербурге и некоторых городах Ленинградской области сосредоточены научно-исследовательские институты, производственные объединения и предприятия, использующие радиоизотопную продукцию и радиационные технологии, работающие с ускорителями заряженных частиц и т. д., которые по своему статусу относятся к радиационно-опасным объектам.

Нами рассматривается территория, ограниченная Ленинградской областью и городом Санкт-Петербургом. Данная территория занимает первое место в Северо-Западном регионе по количеству жителей, плотности населения, суммарной мощности ядерных реакторов и количеству используемых источников ионизирующего излучения (ИИИ) [1]. Существенный вклад ядерной энергетики (51% в системе «Ленэнерго»), широкое применение в народном хозяйстве и научной деятельности радионуклидов, естественно, сопровождается образованием радиоактивных отходов (РАО) и радиоактивных материалов, требующих надёжной изоляции от биосферы.

В г. Сосновый Бор (Ленинградская область) в пределах сравнительно небольшой промышленной зоны сосредоточены предприятия атомно-промышленного комплекса:

1. Ленинградская АЭС с 4-мя реакторами типа РБМК-1000 и всей транспортно-технологической инфраструктурой, обеспечивающей доставку и хранение ядерного топлива, хранение облученного ядерного топлива (ОЯТ), с комплексом обращения с радиоактивными отходами (РАО).

2. Научно-исследовательский технологический институт им. А. П. Александрова (НИТИ) с комплексом экспериментальных ядерных установок, включающим крупномасштабные стенды и энергоблок нового поколения ВВЭР-640.
3. Ленинградский спецкомбинат «Радон» – предприятие по сбору, переработке и хранению РАО Северо-Западного региона. Начиная с 1962 г. введено в эксплуатацию более 15 наземных хранилищ, бóльшая часть которых заполнена и законсервирована.
4. Предприятие по дезактивации и переработке металлических РАО – ЗАО «Экомет-С».

Территория в пределах 30-километровой зоны ЛАЭС с площадью около 1200 км^2 и населением около 100 тыс. человек находится под радиационным и химическим контролем соответствующих служб ЛАЭС, НПО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина», НИТИ, Спецкомбината «Радон». В соответствии с Федеральной целевой программой за счёт интеграции существующих государственных и ведомственных систем радиационного контроля создается Единая государственная автоматизированная система контроля радиационной обстановки (ЕГАСКРО), в которую входит подсистема автоматизированного радиационного контроля в районе радиационно-опасного объекта (АСКРО-РОО).

Ситуация с РАО на ЛАЭС достаточно напряженная, что связано, в первую очередь, с заполненностью емкостей для кубовых остатков, хранилищ пульп ионообменных смол, малой производительностью системы битумирования. В настоящее время облученное ядерное топливо (ОЯТ) реакторов РБМК-1000 не подвергается переработке и хранится в контролируемых условиях на территории станции. На Ленинградской АЭС количество ОЯТ в хранилищах в 3 раза больше, чем в активных зонах. Расположение ЛАЭС вблизи крупного мегаполиса Санкт-Петербурга, Финского залива Балтийского моря и государственной границы России требует повышенного внимания к проблемам радиационной безопасности [2, 3].

В Санкт-Петербурге более 300 организаций имеют радиоактивные вещества (РВ) и ИИИ, 32 крупных предприятия используют радиационные технологии. За последнее десятилетие в пределах города обнаружено более 2000 участков техногенного неаварийного радиоактивного загрязнения площадью от 1 м^2 до 1 га [4].

Хранение РАО осуществляется на Ленспецкомбинате (г. Сосновый Бор) и на нескольких небольших площадках: район Шкиперского протока (Санкт-Петербург); Санкт-Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова (г. Гатчина); пос. Кузьмолово, Приветнинское и др. Суммарная активность РАО, хранящихся на Ленспецкомбинате, составляет около $2 \cdot 10^{16}$ Бк [4]. Приповерхностное хранилище представлено 16 железобетонными зданиями, построенными без заглублений на железобетонных плитах (65-80 см), уложенных на поверхность насыпного грунта. Используемый вариант хранения не гарантирует радиационно-экологическую безопасность, в связи с чем поиск альтернативных, более надежных способов изоляции РАО представляется весьма актуальной народнохозяйственной и научной задачей.

Перспективы обращения с РАО в Северо-Западном регионе в принципе благоприятны. Для подземной локализации радионуклидов рассматриваются древние кристаллические формации Кольского полуострова и Карелии, солевые пласты Двинско-Сухонского бассейна и мощный пласт нижнекембрийских глин Ленинградской области [5]. В 1988-1990 гг. поисково-геологической организацией «Невск-

геология», трестом «Спецтранс» и НПО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина» были проведены поисково-рекогносцировочные работы в пределах Кингисеппского, Ломоносовского и Волосовского районов Ленинградской области [6].

Для предварительного исследования были рекомендованы 24 отдельные площадки. Наиболее благоприятные условия для детальных исследований были выявлены в районе с. Копорье Ломоносовского района, в непосредственной близости от денудационного регионального уступа – глинта. В 1992 г. организация «Невскгеология» по заказу Ленспецкомбината обследовала и провела разбуривание на трёх площадках к северо-востоку от с. Копорье в пределах 30-километровой охранной зоны промышленного комплекса г. Сосновый Бор.

На основании проведенных предварительных исследований были сделаны следующие заключения [6]:

1. На территории Северо-Западного региона существуют геологические условия и перспективные породы для строительства подземного хранилища РАО. Такими породами следует считать пласты нижнекембрийских синих глин.
2. Для оценки надёжности подземной изоляции необходимы комплексные исследования с учётом специфических особенностей отдельных участков, разработка дополнительных критериев безопасности системы изоляции во времени.
3. В качестве первой очереди строительства хранилища должна быть создана подземная исследовательская лаборатория.

1. Общие сведения о территории распространения нижнекембрийских глин в центральной части Ленинградской области

1.1. Географическое и административно-территориальное положение

Ленинградская область и г. Санкт-Петербург расположены в северо-западной приграничной части Российской Федерации на побережье Финского залива Балтийского моря, по берегам двух крупнейших пресноводных озер страны – Ладожского и Онежского. Население области около 1,7 млн. человек; население Санкт-Петербурга с подчиненными городу территориями – более 5 млн. человек. Область занимает площадь около 85 тысяч км^2 и расположена в умеренных широтах лесной зоны. 20,5% площади представлены землями сельскохозяйственного значения, 56,3% – землями лесного фонда. Водный фонд составляет 12,9% [7].

Промышленность области тесно связана с Санкт-Петербургом, с тяжелым машиностроением, электротехнической и приборостроительной промышленностью, вагоно- и судостроением, промышленным оборудованием и пр. В области развита черная и цветная металлургия, нефтеперерабатывающая, химическая, деревообрабатывающая, легкая и пищевая промышленность. Производится добыча бокситов, фосфоритов, сланцев, торфа, строительных материалов (пески, глины, граниты, известняки и пр.). На реках Свирь, Волхов, Вуокса, Нарва построены ГЭС, у г. Кириши – крупная ГРЭС. На южном берегу Финского залива расположена Ленинградская АЭС (г. Сосновый Бор).

Сельское хозяйство области имеет пригородную специализацию: молочно-мясное скотоводство, свиноводство, птицеводство. Значительные площади отведены под посевы кормовых и зерновых культур, развито картофелеводство, овощеводство. Область имеет разветвленную сеть железных и шоссейных дорог.

Санкт-Петербург – крупный железнодорожный узел. Через территорию, окружающую ЛАЭС, проходят железнодорожные коммуникации, связывающие Санкт-Петербург с Эстонией (приграничная ст. Ивангород) и с быстрорастущим перевалочно-портовым центром в Лужской губе (Санкт-Петербург – Сосновый Бор – Котлы – Усть-Луга). По области проходят трассы федеральных дорог, связывающих Санкт-Петербург с Мурманском, Вологдой, Москвой, Псковом, Ивангородом. Завершается строительство кольцевой автодороги (А-120).

Санкт-Петербургский мегаполис вместе с территориально и экономически связанной с ним Ленинградской областью – крупный, высокоразвитый регион России. Весьма существенно, что исторически сложившийся высокий научно-производственный и хозяйственный уровень города и области продолжает расти и развиваться в наше время. Специализация и направленность современного развития области весьма многогранны: от сооружения крупного портового терминала в Лужской губе до освоения месторождений железо-марганцовых конкреций Финского залива [8].

Доступная для открытой разработки полоса развития нижнекембрийских глин с мощностью пласта 100-130 м протягивается в субширотном направлении на 250 км от р. Нарвы на западе до р. Сясь на востоке, занимая южное побережье Финского залива, район бассейна р. Невы и юго-восточное побережье Ладожского озера (рис. 1).

В пределах Ленинградской области эта полоса ограничена координатами: 59°30' – 60°10' с. ш. и 28°10' – 32°00' в. д. Наиболее перспективная ситуация для строительства регионального хранилища РАО складывается для западной части выделяемой полосы глин в пределах Кингисеппского, Ломоносовского и Волосовского районов. Особенности этой территории будут характеризоваться наиболее подробно.

1.2. Рельеф территории

Рассматриваемая территория по специфике форм рельефа относится к Балтийско-Ладожской области в границах обширного понижения доледниковой поверхности. Высота большей ее части над уровнем моря не превышает 100 м с отдельными возвышенностями, поднимающимися до 200 м. Вся территория имеет характерный ледниковый и послеледниковый рельеф, возникший в интервале от 50 до 10 тыс. лет назад во время таяния последнего (валдайского) ледника [1].

Вдоль побережья Финского залива расположена терраса Литоринового моря (предшественника современного Балтийского моря) с абсолютными отметками от 0 до 20 м. Древняя терраса ограничена абразивными уступами и береговыми валами, местами, превращенными в дюны. Вдоль южного берега Ладожского озера расположена озерная равнина с абсолютными отметками 4-16 м, образованная около 3,5 тыс. лет назад во время подъемов уровня озера.

Поверхность Ленинградской области – равнина, но её рельеф не монотонный. К югу от Финского залива находится Ижорская возвышенность, на востоке – Тихвинская и Вепсовская возвышенности. Местами над равнинными участками местности выделяются изолированные возвышенности: к югу от Санкт-Петербурга – Дудергофская, на западе – Сойкинские «горы». Древняя «довалдайская» поверхность представляла собой ступенчатую равнину, расчлененную сетью долин. Неровности древнего рельефа стали местами «разгрузки» рыхлого материала, принесенного ледником. Аккумуляция ледниковых наносов происходила в основном на территории Русской плиты.

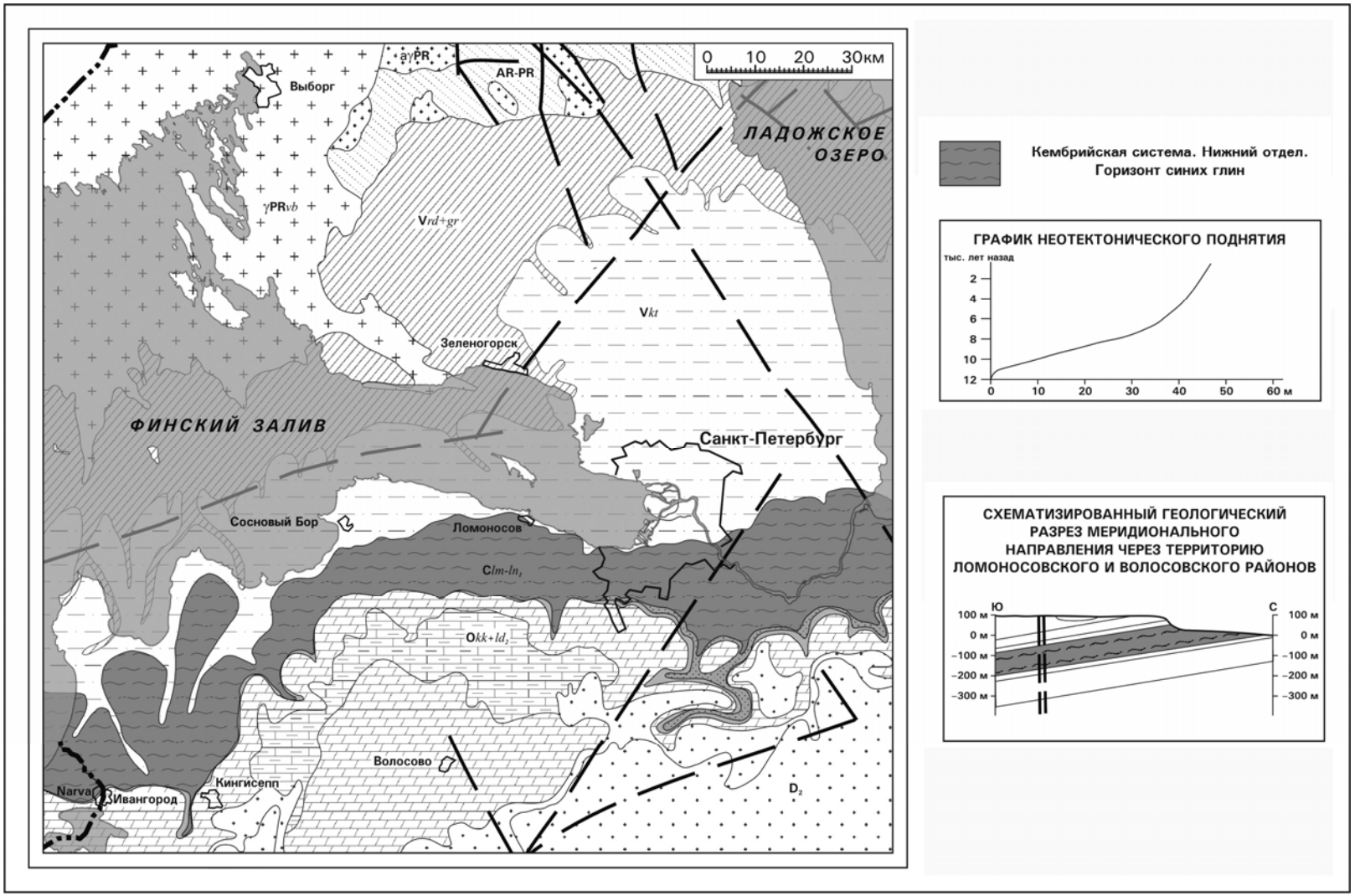


Рис. 1. Подземное захоронение радиоактивных отходов. Структурно-формационная геологическая основа.

Наиболее перспективная территория развития нижнекембрийских глин расположена на южном побережье Финского залива. Здесь, в пределах прибрежной полосы шириной 15-25 км, располагается Предглинтовая низменность. Это палеотеррраса Литоринового моря, предшествовавшего современному Балтийскому. Поверхность её плоско-волнистая, местами заболоченная, с абсолютными отметками 0-20 м. На юге и юго-востоке низменность ограничена Балтийско-Ладожским денудационным выступом – глинтом, протянувшимся вдоль южного берега Финского залива и Ладожского озера от Ивангорода до Волхова. Современный глинт является унаследованной формой рельефа, определяющей смену относительно рыхлых пород Предглинтовой низменности прочными карбонатными породами ордовика. Последние образуют слегка приподнятое над окружающей равниной Ижорское плато. Максимальная абсолютная отметка бровки глинта между пос. Копорье и Красным Селом – около 100 м. Отсюда к западу и востоку наблюдается снижение отметок до 20-40 м, с соответствующим понижением относительной высоты глинта от отметок 25-40 м до 5-10 м. Максимальная абсолютная отметка плато составляет 168 м.

Ижорская возвышенность является моренным плато с маломощным покровом ледниковых осадков. Резкое ограничение глинтом на севере и северо-западе сменяется на юге и востоке плавным понижением плато в сторону Восточно-Европейской равнины. Небольшая мощность четвертичных отложений способствует широкому развитию в ордовикских карбонатных породах ордовика карстовых форм рельефа: воронок, сухих долин.

Рельеф и почвенно-метеорологические особенности отдельных территорий формируют ландшафты, различающиеся направлениями их рационального использования и охраны природы. В пределах Ижорского плато зе́мли используются в основном для сельского хозяйства, восстановления и благоустройства лесов. Северо-западнее и юго-западнее расположены территории лесохозяйственного и рекреационного использования с восстановлением лесов, рекультивацией земель и созданием заказников. К юго-востоку от плато большая территория используется в сельскохозяйственных и лесохозяйственных целях с частичной раскорчёвкой и поверхностным осушением земель [7].

Многие участки Ленинградской области являются природными заповедниками разнообразных форм ледникового и водно-ледникового рельефа. Одновременно эти же участки перспективны для поисков, разведки и эксплуатации полезных ископаемых, строительных песков, гравия, кирпично-черепичных глин, известняков, торфа и пр. Соблюдение наиболее рациональных, щадящих методов разработки, любого внедрения в природную среду является предметом особого внимания населения и руководства областной и районных администраций.

1.3. Гидрографическая сеть

В пределах Ленинградской области находятся две крупные акватории – Финский залив и Ладожское озеро. Финский залив неглубок: около 100 м на входе, а мелководья в его восточной части (в пределах Невской губы) – до 5 м и менее. На его берегах расположены крупные порты Санкт-Петербурга, Хельсинки, Таллинна и Усть-Луги. Акватория Невской губы является приёмником сточных вод всех населенных пунктов и промышленных центров восточного побережья, в том числе и Санкт-Петербурга. Здесь же завершается строительство сложной водорегулирующей системы дамб.

Ладожское озеро – крупнейший пресный водоём Европы с площадью более 17 тыс. км^2. В озеро впадает 32 реки, а вытекает одна Нева. Ладожское озеро является источником питьевого водоснабжения пятимиллионного Санкт-Петербурга и части Ленинградской области. Средняя глубина озера 50 м, наибольшая – 223 м. Объем воды – 895 км^3, средняя минерализация – 56 мг/л. В связи со значительным увеличением объемов сточных вод с начала 70-х годов экологическое состояние этого крупнейшего в стране водоёма вызывает тревогу [9].

В юго-западной части Ленинградской области в Финский залив впадают несколько небольших рек: Луга, Коваши, Систа. В их питании основную роль играют подземные воды, формирующиеся в карбонатных закарстованных породах. В краевой северной и северо-западной части Ижорского плато берут начало маловодные небольшие реки. В пределах Предглинтовой низменности расположена серия озер. Ленинградская область в целом – одна из самых озерных на Русской равнине. Более 1800 озер занимают почти 14 % её территории. В основном, это моренные озера Карельского перешейка, а также озера восточной части области, образовавшиеся на моренных наносах после отступления ледника.

Почти пятую часть Ленинградской области занимают болота (17% территории), дающие начало многочисленным рекам и ручьям. Большое количество болот связано с избыточной влажностью на плоских участках рельефа и близостью залегания грунтовых вод. Наиболее заболочена приозерная Ладожская равнина, бассейн р. Невы и водораздел Финского залива и Ладожского озера – Карельский перешеек. Преобладают болота характерного олиготрофного типа с атмосферным питанием, выпуклой поверхностью и мощными торфяными залежами. Относительно сухое Ижорское плато окружено перспективными и функционирующими торфоразработками, в том числе и по южному берегу залива в полосе Предглинтовой низменности.

1.4. Климатические условия

Климат Ленинградской области – атлантико-континентальный: с умеренно холодной зимой и нежарким влажным летом. Определяющим фактором формирования климата является атмосферная циркуляция. С крупными циклонами и антициклонами на территорию области поступают воздушные массы, образующиеся над различными регионами и имеющие поэтому разные свойства: температуру, влажность, тип облаков и осадков. Наиболее сложные погодные условия обычно в зонах встречи крупных, но различных по параметрам воздушных масс.

С запада, со стороны Атлантики, поступает влажный морской воздух, который вызывает похолодание летом и оттепели зимой, приносит осадки в виде дождя и снега. Воздушные потоки с континента несут потепление летом и резкое похолодание зимой. Поступление арктических воздушных масс с севера и северо-запада приводит к неустойчивому характеру погоды.

Количество дней с преобладанием влажных морских и сухих континентальных приблизительно одинаковое. Среднегодовая температура воздуха составляет +4,5 °С на западе области и +2,6 °С на востоке. Самый холодный месяц – январь с колебаниями средних температур от –7 °С до –11 °С. Самый теплый месяц – июль с температурой воздуха 16-17 °С. В особо теплые дни температура повышается до 32-34 °С. Однако летом возможны похолодания с понижением температуры до 5-10 °С.

Вся территория области находится в зоне избыточного увлажнения при относительной влажности воздуха от 50 до 90%. Количество осадков колеблется от 550

до 850 мм в год, а испаряется всего 300 мм. Следовательно, больше половины выпадающих осадков впитываются почвой или стекают в водоемы.

Под влиянием физико-географических условий (близость крупных водоёмов, разнообразие рельефа, наличие болот и пр.) возникают местные вариации климата. Так, на побережье Финского залива температура воздуха весной на 1 °С ниже, а осенью – лишь несколько выше, чем в районах, удаленных от берега.

Переход от сезона к сезону постепенный, с трудно оцениваемыми границами зимы, весны, лета и осени. Зимой количество осадков невелико – 40-55 мм в месяц, но дожди в начале зимы – обычное явление. Весной возможно вторжение арктических масс воздуха, с которыми связаны похолодания и ночные заморозки. Первая половина лета более теплая и солнечная, вторая – более пасмурная, ветреная и дождливая.

Средняя из наибольших за зиму высот снежного покрова в полях колеблется от 30-40 см для западного района до 55 см в восточных.

2. Геологическое строение юго-западной части Ленинградской области

Геологическое строение и структура всей Ленинградской области определяется особенностями её положения на сочленении Балтийского щита и Русской плиты, в пределах северо-западной части Восточно-Европейской платформы.

В пределах области кристаллический фундамент представлен центральной частью Балтийского щита – Лапландско-Карельской глыбово-складчатой областью, протянувшейся полосой северо-западного простирания от южных окончаний Ладожского и Онежского озер через Карелию до северных территорий Швеции [10]. В позднем архее здесь развивалась неоднородная подвижная область, которую можно определить как протогеосинклинальную. В интервале 2900-2600 млн. лет назад первичная кора претерпела интенсивную складчатость, метаморфизм, гранитизацию и была повторно консолидирована. В свеко-карельское время (2600-1600 млн. лет назад) Лапландско-Карельская область находилась в краевой части крупной Свекофеннской геосинклинали, испытывая проявления деструктивных процессов, блокового движения и неоднократной смены условий растяжения – сжатия. В конце свеко-карельского времени зональное проявление складчатости, метаморфизм и гранитоидный магматизм завершили формирование структурно-тектонического строения этой части фундамента (рис. 1).

В протерозойское время на территории Балтийского щита происходило последовательное формирование, по крайней мере, трёх групп гранитоидов в возрастных интервалах 2400-1900, 1800-1500 и 1300-900 млн. лет.

Кристаллический фундамент юго-западной части Ленинградской области представлен в основном архейско-протерозойскими гнейсами и мигматитами, переходящими на юго-востоке в мигматитовую полосу с северо-восточной ориентацией структур. По южному побережью Финского залива проходит полоса архейских кристаллических сланцев с такой же структурной ориентировкой. В гнейсы и мигматиты внедрены архейско-протерозойские и протерозойские гранитоиды, образующие разновеликие массивы. Архейско-протерозойские интрузивно-метаморфогенные комплексы щита представляют кристаллический фундамент, который моноклинально погружается в юго-восточном направлении.

В вендское время (650-570 млн. лет) к юго-востоку от Балтийского щита началось опускание обширной части Восточно-Европейской платформы, которое продолжалось с короткими перерывами до конца раннего ордовика (около 480 млн. лет

назад). С венда началось формирование в качестве самостоятельной структурно-тектонической единицы платформы – Русской плиты. Осадочные породы формирующегося чехла залегают на кристаллическом фундаменте, полого погружаясь на юго-восток (рис. 1). В составе осадочного чехла присутствуют породы венда, кембрия, ордовика, девона и карбона. Мощность осадочных пород нарастает по падению поверхности фундамента и у юго-восточной границы области достигает 600-700 м.

В составе осадочного чехла преобладают в основном терригенные отложения с преимущественным развитием глин и песчано-глинистых пород, что особенно характерно для доордовикской и девонской части разреза. Карбонатные отложения связаны, в основном, с ордовикской системой, верхами нижнего отдела и средним отделом каменноугольной системы [11].

Нижняя часть осадочного чехла сформирована отложениями вендского времени:

- песчаниками и алевролитами гдовского горизонта (70-100 м);
- глинами и аргиллитами котлинского горизонта (40-100 м).

В пределах Санкт-Петербургского региона верхнекотлинские глины наиболее широко распространены среди дочетвертичных пород. Глубина их залегания варьирует от 5 до 120 м и определяется формами подземного рельефа: положением погребенных долин, амплитудами движения отдельных тектонических блоков фундамента и пр. В этих условиях мощность глинистых отложений может изменяться от 12 до 120 м. Верхнекотлинские глины представлены плотными, зеленовато-серыми тонкослоистыми алевритовыми разновидностями. В их верхних пластах присутствуют прослои песчаников мощностью 0,2-0,4 м. Микроструктура глин тонкополосчатая, полосчато-сланцевая, реже массивная. Мелкодисперсная составляющая представлена гидрослюдами, среди которых преобладает иллит, и каолинитом.

В верхнекотлинских глинах проложена бóльшая часть тоннелей Санкт-Петербургского метрополитена, проходят наиболее глубокие канализационные коллекторы.

Морская трансгрессия в кембрии сопровождалась накоплением глинистых отложений, перекрывающих осадки вендского времени. Нижний отдел кембрия представлен песками и слабосцементированными глинами песчаниками ломоносовской свиты. В предглинтовой низменности породы свиты распространяются под четвертичными отложениями на запад и юго-запад. К нижнекембрийским песчаникам мощностью 20-40 м приурочен водоносный горизонт (ломоносовский), используемый для водоснабжения в западной и центральной частях Ленинградской области.

Ломоносовский водоносный горизонт перекрыт толщей нижнекембрийских глин лонтоваской свиты, которые из-за своего цвета обычно называют «синими». Отложения нижнекембрийских глин широко распространены на территории Ленинградской и Новгородской областей, кроме узкой полосы вдоль южного берега Финского залива, где они были размыты и эродированы в предчетвертичное время. Мощность синих глин постепенно увеличивается от 2-10 м в зоне размыва до 100-200 м в юго-западной части рассматриваемой территории. Как и все осадочные породы чехла Русской плиты, нижнекембрийские глины залегают моноклинально с пологим падением на юго-восток в сторону погружения северо-западного крыла Московской синеклизы под углами 9-12°.

Глины визуально представляют аргиллитоподобную или пластичную, неяснослоистую или однородную породу. Характерна зеленовато-серая или синевато-серая окраска, определившая общепринятое название. Встречаются разновидности, окрашенные в фиолетовые или коричнево-красные тона.

По гранулометрическому составу глины классифицируются как алевритовые, реже – тяжелые алевритовые. Тонкодисперсная часть представлена гидрослюдами, глауконитом, хлоритом, реже – монтмориллонитом, мельниковитом (гелеморфными выделениями дисульфида железа). В тонкодисперсной массе глин спорадически встречаются довольно крупные зерна кварца, полевого шпата, глауконита, кристаллы пирита. Тонкорассеянный пирит иногда образует на плоскостях наслоения темно-бурые пленки, напоминающие по своей форме ходы червей.

Основными минералами являются кварц, гидрослюды и полевые шпаты, количественные соотношения которых могут варьировать. В среднем минеральный состав следующий (пробы на предглинтовой полосе): кварц – 30-36%; гидрослюды – 23-29%; биотит – 13-16; мусковит – до 11%; полевые шпаты – 8-10%. В существенно глинистых прослоях основными минералами являются гидрослюды (80-89%) и каолинит (10-20%). В тяжелой фракции присутствуют циркон, эпидот, рутил.

Абсолютный возраст нижнекембрийских глин определен по сингенетичному по отношению к вмещающей толще глаукониту [12] (табл. 1).

Таблица 1

Возрастные данные аргонового метода для глауконитов из нижнекембрийских глин Русской платформы

№№ п/п	K, %	^{40}Ar, 10^{-7} г/г	Возраст, млн. лет
1	4,66	1,98	530
2	5,84	2,75	567
3	5,33	2,56	590

Приведенные изотопно-возрастные данные не претендуют на уровень опорных цифровых значений, но однозначно свидетельствуют о хорошей закрытости системы K-Ar в сравнительно легко метаморфизуемом минерале, а следовательно, длительной стабильности состояния всей глинистой толщи в течение полумиллиарда лет. Присутствие глауконита позволяет провести детальные изотопно-геохимические исследования глин при разработке прогноза условий подземной изоляции радионуклидов на длительные промежутки времени.

В толще глин довольно часто присутствуют прослои алевролитов и песчаников, мощность которых не превышает 10-15 см. Алевролиты зеленовато-серые, кварцевые, слюдистые. Кроме слагающих породу кварца и полевого шпата в них присутствуют слюды, глауконит. Цемент по составу доломитовый или глинисто-доломитовый. Песчаники тонкозернистые, кварцевые, слабослюдистые, глинистые, иногда с повышенным содержанием глауконита. Окраска их серая или зеленовато-серая.

Кембрийские отложения завершаются слабосцементированными глинистыми песчаниками люкатиского и тискреского горизонтов с мощностью 5-15 м.

В ордовике происходило накопление железистых песчаников его нижнего отдела – тосненская свита пакерортского горизонта. Мощность песчаников – 10-15 м. Выше залегают диктионемовые сланцы нагорской свиты и глинистые породы леэтской свиты. Нижнеордовикские породы перекрыты мощной толщей (120-180 м) известняков и доломитов, слагающих Ижорскую возвышенность. Ордовикские известняки образуют уступ, протянувшийся с запада на восток вдоль Финского залива и южного берега Ладожского озера – Балтийско-Ладожский глинт с относительной высотой до 40-60 м.

Плато ордовикских известняков полого погружается в юго-восточном направлении и перекрывается толщей песчано-глинистых отложений девонского возраста с мощностью от 50 м на северо-западе и до 450 м на юго-востоке.

Ордовикские кварцевые песчаники с руководящей фауной – раковинами моллюсков оболюсов (оболовые песчаники) – обогащены фосфором в пределах пакерортского горизонта. Нижнеордовикские фосфориты образуют Кингисеппское месторождение, расположенное на западе области в междуречье Луги и Нарвы, которое разрабатывается открытым способом. Шесть карьеров расположены в субширотной полосе длиной около 15 км.

На оболовых песчаниках залегают диктионемовые сланцы – глинистые породы, на 15-20% состоящие из органического вещества – остатков граптолитов. Пласт их сравнительно маломощный, но западнее Павловска толщина сланцев достигает 4-5 м. Внимание к этим породам привлекает повышенное содержание урана, в 10-100 раз превышающее средние концентрации этого радионуклида в глинистых породах ордовика Русской платформы – $3{,}2 \cdot 10^{-6}$ г/г [13]. При выходе диктионемовых сланцев на поверхность в зонах застройки южных районов Санкт-Петербурга возникает повышенная радоноопасность помещений [1].

Ордовикские известняки и доломиты с повышенным содержанием органических остатков (сине-зеленые водоросли и др.) образуют пачки горючих сланцев – кукерситов, которые добываются в окрестностях г. Сланцы.

Начиная с каменноугольного периода и до четвертичных оледенений, значительная северо-западной территории области существовала как суша.

Палеозойские отложения девонского и каменноугольного возраста развиты в восточной части, в пределах Ижорского плато, Приильменской низины и Вепсовской возвышенности. Последняя на северо-западе выделена крутым Карбоновым уступом смены верхнедевонских и нижнекаменноугольных пород.

В условиях химического выветривания в осадочных породах карбона сформировались бокситы, разрабатываемые на Радынском месторождении [14].

В 1996-1997 гг. в породах нижнего карбона на Пикалёвском месторождении известняков обнаружены бентонитовые глины [15]. Прогноз ресурсов бентонитов, доступных для эксплуатации, составляет 400-500 млн. т.

После начала четвертичного периода (1,6 млн. лет назад) территория области, по меньшей мере, четыре раза покрывалась ледниками. Ледовые массы двигались с севера и северо-запада со стороны Фенно-Скандии. Вторжение и отступление ледников фактически сформировали современные рельеф и водные системы. Немногим более 10 тыс. лет назад отступил ледник последнего Валдайского оледенения. Около 9,5 тыс. лет назад во впадину, занятую сейчас Балтийским морем, проникли воды из Атлантики и Белого моря. Образовался крупный пролив – Иольдиевое море, которое затем сменилось Вторым Иольдиевым, Анциловым и Литориновым морями. При отступлении последнего установились современные границы Балтийского моря и Финского залива. Остатками ледниковых водоёмов являются Ладожское, Чудское, Псковское озера, многочисленные озера Карельского перешейка. Существующий доледниковый рельеф изменился, образовались характерные для Ленинградской области ледниковые формы, сложенные гравелистыми, песчаными и глинистыми отложениями.

3. Гидрогеологические условия

По характеру гидрогеологических условий регион представляет северо-западное крыло Ленинградского артезианского бассейна, охватывающего западную часть Московской синеклизы в пределах бассейна Балтийского моря.

На рассматриваемой территории юго-западной части Ленинградской области выделяются несколько гидрогеологических этажей и горизонтов, связанных с различными по возрасту, структуре и составу породами.

Региональная водоносность архейско-протерозойских пород кристаллического фундамента обусловлена обводнением коры выветривания и экзогенной трещиноватостью. В открытой части Балтийского щита трещинные воды проникают на глубину от 80 до 100 м.

В породах осадочного чехла выделяют два гидрогеологических этажа, разделенных водоупорными толщами вендских и нижнекембрийских глин (рис. 2). Это строение нарушается на севере области в зонах выклинивания региональных водоупоров.

В нижней части осадочного чехла располагается высоконапорный нижнекотлинский горизонт венда, известный также под названием «гдовский». В 30-50 км севернее Санкт-Петербурга гдовские воды пресные, в окрестностях города минерализация повышается до 2-5 г/л. Далее на юг сумма солей в воде составляет (г/л): в Сиверской – 12, в Луге – 42, в Старой Руссе – 73, в Валдае – 180. Химический состав вод нижнекотлинского горизонта из скважины в Санкт-Петербурге приведен в табл. 2. С севера на юг увеличиваются мощность горизонта (от 3-5 м до свыше 200 м) и глубина его залегания: на севере Курортного района – 60 м и до 190 м в Красном Селе [16]. Гдовский горизонт – один из основных эксплуатируемых водоносных горизонтов на территории Ленинградской области. На его базе основано водоснабжение курортной зоны Санкт-Петербурга, г. Подпорожья, населенных пунктов Карельского перешейка и восточного побережья Финского залива. В Сестрорецке и Петродворце воды горизонта используются в лечебных целях. Горизонт хорошо защищен глинисто-аргиллитовым водоупором вендских пород. На рассматриваемой нами территории южного берега Финского залива воды нижнекотлинского горизонта практически не используются в связи с их высокой минерализацией.

Ломоносовский водоносный горизонт приурочен к пескам и слабосцементированным песчаникам нижнего отдела кембрия. Мощность горизонта – 1,5-40 м, коэффициент фильтрации варьирует от 0,2 до 5,3 м/сут. Воды преимущественно напорные, гидрокарбонатно-натриевые с минерализацией до 670 мг/л. Концентрация хлорид-ионов достигает 50 мг/л, натрия – 150 мг/л, калия – 4 мг/л (см. табл 2). Горизонт интенсивно эксплуатируется.

По южному побережью Финского залива пьезометрическая поверхность имеет уклон в сторону залива, куда осуществляется совместная разгрузка вод ломоносовского и четвертичного горизонтов. В юго-западной части рассматриваемой территории на границе 30-километровой контролируемой зоны ЛАЭС, в районе пос. Котлы, происходит инверсия регионального фильтрационного потока, обусловленная интенсивным водозабором на скважинах ломоносовского горизонта. Водоносный горизонт нижнего кембрия перекрыт водоупором синих глин того же возраста. Мощность водоупора составляет 2-10 м в зоне размыва на побережье залива и увеличивается до 100-200 м в юго-западной части Ленинградской области.

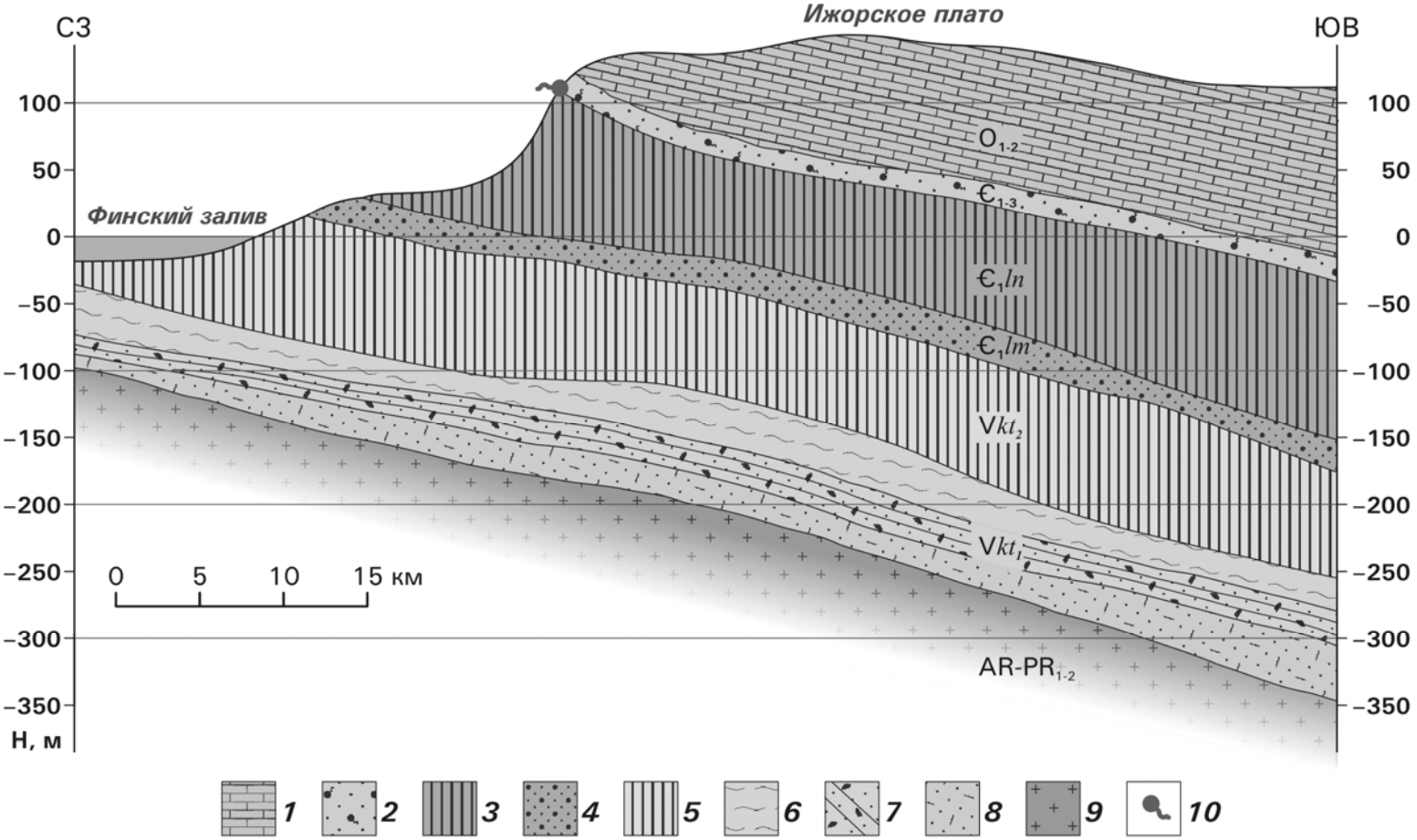


Рис. 2. Схематический гидрогеологический разрез по линии Сосновый Бор – Волосово [35]:

1 – водоносный горизонт ордовикских отложений; 2 – водоносный горизонт верхнего-нижнего кембрия; 3 – лонтовасская свита нижнего кембрия (водоупор); 4 – ломоносовский водоносный горизонт; 5 – верхнекотлинский горизонт венда (водоупор); 6-8 – Vkt_1: 6 – перекрывающие водоупоры котлинского водоносного комплекса, 7 – нижнекотлинский водоносный горизонт, 8 – стрельнинский водоносный горизонт; 9 – архей-протерозойский водоносный горизонт; 10 – источник.

Слабосцементированные глинистые песчаники верхнего-нижнего кембрия мощностью 5-15 м и железистые песчаники нижнего ордовика мощностью 10-15 м образуют кембро-ордовикский водоносный горизонт, распространенный на территории Ижорского плато. В основании глинта, в области естественной разгрузки, его воды узкой полосой выходят на поверхность многочисленными небольшими источниками. По своему химическому составу воды гидрокарбонатные кальциевые с минерализацией до 500 мг/л (табл. 2). Между ордовикским водоносным комплексом и ломоносовским горизонтом гидравлическая связь отсутствует [17].

Таблица 2

Химический состав природных вод различных горизонтов [18]

Компоненты	Водоносные горизонты		
	Нижнекотлинский	Ломоносовский	Ордовикский
Na^+	1600	148	2,6
K^+	20	4,3	1,6
Mg^{2+}	57	2,6	25,7
Ca^{2+}	130,6	5,2	78,7
SiO_3^{2-}	0,5	4,7	3,9
HCO_3^-	–10	458	369
SO_4^{2-}	–10	4,9	15,1
Cl^-	2900	49,2	8,8
NO_3^-	–0,5	–0,1	2,9
NH_4^+	0,9	6,8	7,4
pH	7,0	8,0	7,4

В трещиноватых и закарстованных известняках и доломитах ордовика, непосредственно под четвертичными отложениями располагается верхний ордовикский водоносный горизонт. В центре плато (пос. Бегуницы) глубина залегания вод 20-25 м, вблизи глинта – 1-5 м. Максимальная мощность горизонта – до 50 м, питание – инфильтрационное с разгрузкой от центра плато к периферии. По границе глинта существуют многочисленные нисходящие источники.

Верхний гидрогеологический этаж представлен многочисленными локальными водоносами грунтовых вод надморенного и межморенного горизонтов. Мощность водовмещающих пород варьирует от 1 до 20-30 м, глубина залегания уровня грунтовых вод в среднем составляет 1,5 м.

4. Тектоника и особенности современных геодинамических процессов

Центральная часть территории Ленинградской области расположена в северо-западной части Восточно-Европейской платформы, тяготея к тектонически напряженной зоне сочленения Балтийского щита и Русской плиты. Зона дугой протягивается с северо-востока от Мезенской губы Белого моря на юго-запад до Финского залива. От рифея до мезозоя в пределах зоны происходили активные тектонические и магматические процессы. В узлах сопряжения Балтийско-Мезенской зоны с поперечно-радиальными тектоническими структурами формировались участки минерализации золота, платиноидов, ванадия, урана и пр. В пределах северо-восточной части региональной тектонической дуги в 1982 г. в Архангельской области была выявлена первая алмазоносная кимберлитовая трубка, давшая начало крупному месторождению алмазов [19, 20].

В рассматриваемой западной части территории Ленинградской области, за пределами влияния региональной тектонической зоны, кристаллический фундамент разделен разрывными нарушениями на отдельные блоки, различающиеся по вещественному составу, интегральным плотностным характеристикам и внутренней структуре (рис. 3) [21].

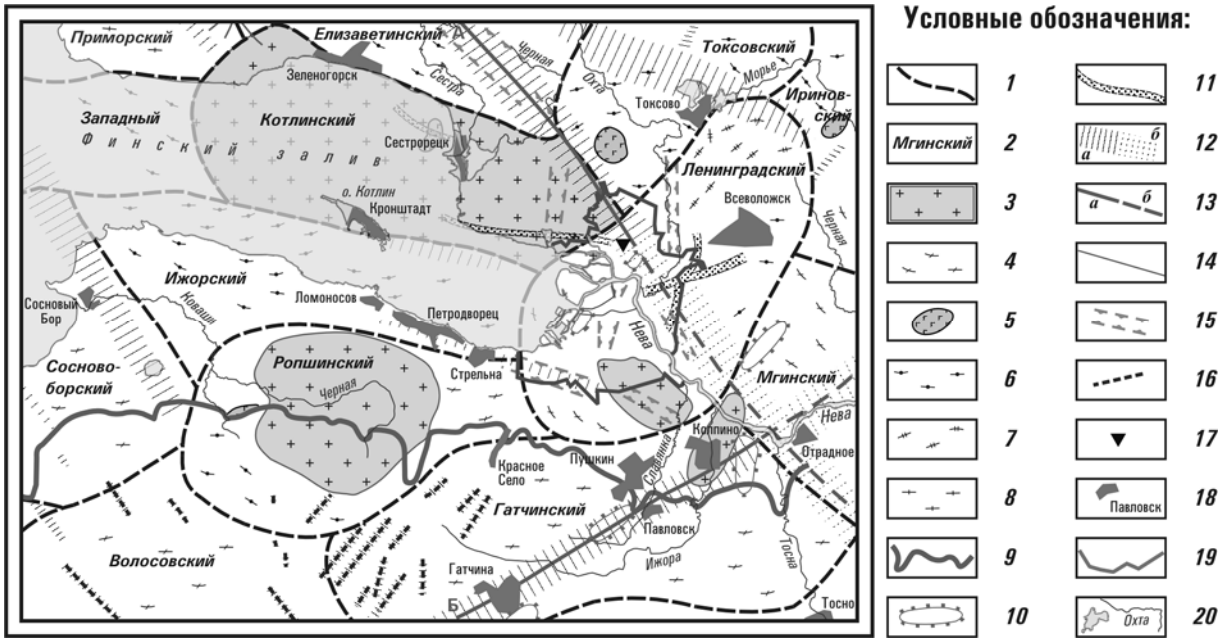


Рис. 3. Блоковое строение западной части Ленинградской области согласно [19], с изменениями и дополнениями. Масштаб 1:1 000 000:

1 – границы блоков (геодинамических систем); 2 – наименования блоков; 3 – граниты плагиомикроклиновые; 4 – гранитогнейсы, граниты порфировидные; 5 – диориты, метагабброиды (в том числе, не входящие в эрозионный срез кристаллического фундамента); 6 – гнейсы биотит-амфиболовые; 7 – гнейсы биотитовые с гранатом и кордиеритом; 8 – гнейсы биотитовые; 9 – ордовикский глинт; 10 – локальные поднятия; 11 – древние долины. «Активизированные» разрывные нарушения кристаллического фундамента: 12 – области динамического влияния разломов (а – достоверные, б – предполагаемые); 13 – региональные разломы (а – достоверные, б – предполагаемые): А – разлом Вещево – Чудово, Б – разлом Гатчина – Колпино; 14 – локальные разломы, установленные по геологическим данным; 15 – контрастные линейные малоамплитудные структуры в рельефе фундамента (по данным бурения, сейсморазведки и электроразведки); 16 – линейные трещинные зоны в карбонатной пачке ордовика; 17 – участок трассы метрополитена с осложненными горно-геологическими условиями; 18 – крупные населенные пункты Ленинградской области и пригородных районов Санкт-Петербурга; 19 – граница городской застройки Санкт-Петербурга; 20 – реки и прочие водоемы.

Ленинградский блок сложен биотитовыми гнейсами с линзами метабазитов с четко выраженной северо-восточной структурной ориентировкой. Крупным элементом в границах блока является региональный разлом северо-западной ориентации Вещево – Санкт-Петербург – Чудово. На одном из пересечений этого разлома с оперяющими разрывными нарушениями находится аварийный участок метрополитена (пл. Мужества). Западнее Ленинградского блока расположен Ижорский блок – геодинамическая система на гранитогнейсовом фундаменте, занимающий территорию южного побережья и южной водной полосы Финского залива. Далее на западе нахо-

дится Сосновоборский блок, который отделен от Ижорского разломом северо-западной ориентации. Область динамического влияния этого разлома распространена преимущественно в сторону Сосновоборского блока. Южнее Ижорского блока расположен Ропшинский блок, а еще южнее – Волосовский. Большинство блоков имеет свою, характерную только для себя, сеть тектонических нарушений, в том числе и активированных. Во время тектонической активизации каждый блок реагирует в соответствии со своей внутренней структурой и использует для разрядки напряжений наиболее близкую по направлению систему разломов.

Ядра сравнительно однородных блоков сохраняют свою стабильность, а наиболее вероятные подвижки происходят по границам блоков и по крупным региональным разломам. Смещения пород фундамента сопровождаются смещениями осадочного чехла. Характер и параметры «наведенных» дислокаций будут определять структурно-геологические особенности пород перекрывающих толщ.

При оценках влияния геоструктурных разломов на подземные сооружения было установлено, что блоки колеблются под воздействием слабых землетрясений со своей частотой колебаний [22]. Связь сбросных и вбросных смещений фундамента с деформациями в пластах венда установлена геофизическими и буровыми работами [21].

С начала фанерозоя тектонические напряжения литосферы проявились в структурах вращения крупных блоков и в крупных разрывных нарушениях. В позднегерцинское (пермско-триасовое) время вращение ядер структур Балтийского щита усилилось. Движения распространились на северную часть Русской плиты, активизировались рифтогенные системы и формирование малоамплитудных пликативных структур осадочного чехла [23]. При этом не исключено существенное изменение изолирующих функций отдельными водоупорными горизонтами.

Основные структуры осадочного чехла формировались под воздействием байкальского, каледонского, герцинского и альпийского циклов орогенеза. Наиболее ярко выражено влияние последнего в неоген-четвертичное время. В это время сформировались крупные денудационно-тектонические структуры, хорошо выраженные в современном рельефе уступы (Балтийско-Ладожский глинт, Карбоновый уступ), были оформлены Ижорская возвышенность, Путиловское плато. В олигоцене территория Ленинградской области была поднята на 100-150 м, что вызвало интенсивный врез речной сети.

Геодинамические условия рассматриваемой территории определяются её размещением в зоне сочленения Балтийского щита и Русской плиты (флексура Полканова), что подразумевает обоюдное влияние тектонических процессов двух крупных литосферных структур на геодинамику конкретных геологических формаций.

При оценке геодинамического состояния Северо-Западного региона в целом принята модель субдукции океанической плиты под континент в связи с раскрытием Палеоатлантического океана [20]. При этом в зонах Осло – Хибины и флексуре Полканова наиболее активно проявился глубинный магматизм. В процессе субдукции активировались древние зоны северо-западного простирания, что привело к формированию ортогональной системы тектонически ослабленных зон, разделяющих крупные жесткие блоки кристаллических пород. По этой модели территория сопряжения Балтийского щита и Русской плиты, в пределах которой находится Ленинградская область, имеет такие же геодинамические характеристики, что и сейсмически активная зона Осло – Хибины. Значительно меньшее число регистрируемых на территории Российской Федерации малоамплитудных землетрясений, характерных

для зоны Осло – Хибины, объясняется отсутствием регистрирующей сети сейсмических наблюдений в пределах Северо-Западного региона России. На территории Скандинавии в сети задействовано более 100 цифровых сейсмических станций [21].

Весь Северо-Западный регион находится в обстановке сжатия, и в тектонически ослабленных зонах могут возникать очаги разрядки. В настоящее время продолжается среднемасштабное геодинамическое районирование территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

4.1. Особенности тектонического развития нижнекембрийских глин

Последовательные тектонические события, различающиеся по времени и характеру их воздействия, сформировали достаточно сложное строение пород осадочного чехла, в том числе мощного пласта нижнекембрийских глин. В особенностях тектонического строения, естественно, нашли отражение стратиграфическое положение, литология и минерально-структурные характеристики этих пород.

Толща нижнекембрийских глин после своего формирования подвергалась воздействию нескольких различных по генезису тектоно-динамических процессов [24, 25]:

1. Длительным даже по геологическим масштабам тектоническим фактором, со времен образования глинистого пласта и до наших дней, являются движения по разломам кристаллического фундамента. Тектонические движения активизировались в ледниковую эпоху, во время которой происходила реакция блоков на развитие и деградацию ледниковых покровов. На определенных этапах оледенения эти подвижки сопровождались оживлением аллювиальной деятельности, внедрением ледниковых кислородсодержащих вод в глубинные части геологических формаций, взаимодействием водной фазы с минеральным окружением и т. д.

В наше время по активным нарушениям перемещения блоков составляют от долей до 2 мм в год. Движения блоков сопровождаются образованием трещин в перекрывающих более молодых породах венда и кембрия над зонами межблоковых разломов и оперяющих эти разломы разрывными нарушениями.

2. Тектонические нарушения на участках слоистых глин создают характерное блочное строение в сравнительно однородной осадочной толще. Параметры блочной структуры зависят от нахождения глин относительно нижерасположенного разлома и от характера литологической слоистости.

3. За время своего существования нижнекембрийские глины прошли несколько стадий прогрессивного и регрессивного литогенеза. В конце мелового периода в пределах Санкт-Петербургского региона глинистая толща была выведена на поверхность, что привело к разуплотнению и палеовыветриванию пород. Сформировалась неотектоническая трещиноватость верхней части разреза, определившая зональное строение всей толщи.

4. Во время оледенений, наступлений ледниковых покровов толщиной до 2,5 км и последующих стаиваний льдов, пласт глин испытал мощные нагрузки, сменяющиеся возвратом к исходному литостатическому состоянию. В глинах эти процессы привели к образованию еще одной системы наложенной трещиноватости.

Необходимо отметить, что процессы оледенения оказывали влияние на состояние геологической среды не только в прошлом. Этот природный фактор внешнего воздействия учитывается во всех вариантах прогноза безопасности для подземных сооружений северного полушария Земли. В шведском варианте прогноза покрытие льдами северной Швеции и Норвегии ожидается через 5 тысяч лет, а кульминация оледенения – через 60 тыс. лет [26].

В итоге нижнекембрийские глины, прошедшие в своем геологическом развитии неоднократное воздействие тектоно-метаморфических процессов, сформировались как зональная, трещиновато-блочная толща. Такое строение требует особого внимания при оценках надежности глинистых пластов в качестве водоупоров и, особенно, в качестве среды для изоляции радионуклидов [25-27]. Наиболее существенные ограничения относятся к сооружению в нижнекембрийских глинах приповерхностных хранилищ.

5. Сейсмичность

Северо-Западная часть Восточно-Европейской платформы характеризуется достаточно активной сейсмической деятельностью, проявляющейся, в основном, частыми, но малоамплитудными землетрясениями [21]. Основной источник динамических воздействий – Норвежская коллизионная зона, проходящая вдоль побережья Скандинавского полуострова, где наблюдается наиболее высокая концентрация землетрясений. Аналогичные явления характерны для зоны Осло – Хибины, предположительно связанной с динамическим воздействием океанической плиты на континент [20]. Сейсмическая активность, кроме того, приурочена к региональным системам северо-западных тектонических зон.

Ленинградская область относится к благоприятной в сейсмическом отношении территории – 3,5 баллов по шкале MSK [28]. Однако существующий уровень знаний о сейсмической активности региона не позволяет надёжно обосновать прогноз возможных сейсмических событий.

За последнее тысячелетие в рассматриваемом регионе были зафиксированы следующие подземные толчки и слабые землетрясения [14]:

- 1089 г. – новгородские земли;
- 1107 г. – там же;
- 1109 г. – там же;
- 1130 г. – там же;
- 1804 г. – Петербург;
- 1881 г. – Ивангород;
- 1904 г. – Лужский уезд.

В 1976 г. на о. Осмуссаар в Балтийском море произошло землетрясение с интенсивностью в эпицентре 6-7 баллов по шкале MSK.

В Санкт-Петербурге и Ленинградской области неоднократно фиксировались отдаленные, но достаточно интенсивные землетрясения. К ним относятся два землетрясения в Карпатах, в сейсмической области Вранча, в 1977 г. (M=7,2) и в 1986 г. (M=7,0).

Землетрясения любой интенсивности создают в структурных блоках литосферы собственные весьма слабые колебания. Наличие осадочного чехла может усиливать эти колебания почти в два раза [22]. Пока неясно, как будут реагировать на постояннодействующий сейсмический фактор подземные сооружения в перекрывающих кристаллические блоки осадочных толщах, и влияние на него физико-механических свойств различных пород, например глин.

В настоящее время существуют и хорошо себя зарекомендовали несколько методов изучения геологической среды, активных внутриплитных и внутриблоковых разломов: геофизические, газовые и пр. На опыте Калининской АЭС доказана перспективность сочетания традиционных методов с гравимикросейсмическими иссле-

дованиями для оценок риска, связанных с возможными сейсмическими событиями, а также со степенью «усталости» или «текущей прочностью» объектов среды [29].

6. Критерии выбора перспективных участков

Сложность проблемы изоляции радиоактивных материалов в геологических формациях потребовала выработки нескольких групп специализированных критериев выбора площадок: геологических, инженерно-строительных, экологических, организационно-экономических и пр. Наряду с общепринятыми международными принципами и критериями оценки безопасности захоронения РАО [30] разработаны дополнительные критерии, учитывающие геологические особенности конкретного участка планируемого строительства и номенклатуру изолируемых материалов [31-34].

Для нижнекембрийских глин Ленинградской области полный анализ соответствия вмещающей геологической среды требованиям базовых критериев выбора площадок не проведен. Рассмотрены отдельные факторы, определяющие безопасность подземной изоляции и, в основном, ограничения, которые требуют соответствующей информации по номенклатуре РАО, типу хранилищ, расположению площадок и пр. [6, 24, 25, 35, 36]. По имеющимся данным можно рассмотреть направления и специфику необходимых исследований для оценок соответствия среды общим геологическим критериям [37]. В первую очередь необходимо выделить характеристики глин и их окружения, которые могут негативно сказаться на безопасности подземной изоляции.

1) Конфигурация площадки

Объемы литосферного пространства, необходимые для подземного геотехнологического комплекса, будут определяться характером и количеством изолируемых радиоактивных материалов. Специалисты Радиевого института в 1992 г. рассматривали различные варианты [6]:

- вблизи берегового глинта, на участках выхода нижнекембрийских глин возможно сооружение слабозаглубленного могильника тоннельного типа для средне- и низкоактивных РАО;
- южнее, где мощность пласта глин и перекрывающих пород увеличивается, необходим шахтный или тоннельно-шахтный вариант;
- в случае оставления ОЯТ в регионе необходимы хранилища на глубинах 300-500 м.

Позднее специалистами ВНИПИЭТ, Радиевого института, ГГП «Невскгеология» и другими организациями предлагались различные варианты и типы хранилищ [38, 39].

Вполне очевидно, что создание в Ленинградской области регионального хранилища в первую очередь требует разработки обоснованной концепции, составленной на базе кадастра РАО и прогнозных экологических оценок влияния различных типов хранилищ.

Проблема достаточно сложная, поскольку необходимо рассмотреть возможность перемещения отходов Ленспецкомбината, выработку ресурсов блоками ЛАЭС, хранения ОЯТ и пр. Наряду с региональными вопросами воздействия атомно-промышленного комплекса, принятием решений по ОЯТ ЛАЭС, необходимы такие конкретные работы, как выявление и учёт источников ионизирующих излучений, проводимые в настоящее время в Радиевом институте.

2) Геология

Глины являются одной из благоприятных геологических сред для подземной изоляции РАО. Для этих пород имеется достаточно богатый опыт исследований, выявивший их достоинства и недостатки [40]. Для нижнекембрийских глин к таким недостаткам следует отнести их минералогический состав с преобладанием гидрослюд, а не монтмориллонита; анизотропию пластов, обусловленную наличием песчанистых прослоев; трещиновато-блочную структуру, характерную для верхних частей разреза пласта. При выборе участков эти свойства среды должны быть исследованы наиболее подробно.

3) Гидрогеология

Нижнекембрийские глины подстилаются водоносными нижнекембрийскими песчаниками ломоносовской свиты. Водоносный горизонт используется для водоснабжения. Положение подземного хранилища и степень его изоляции относительно ломоносовского водоносного горизонта является наиболее острой проблемой при оценках безопасности и аргументации этой безопасности для населения.

4) Характеристика миграции радионуклидов

Лабораторные исследования барьерных свойств нижнекембрийских глин по отношению к радионуклидам проведены в Радиевом институте и показали достаточно высокую удерживающую способность образцов по отношению к стронцию, цезию, плутонию и америцию [5, 6, 36]. Однако исследуемые глины имеют ряд специфических свойств, которые могут улучшать или снижать их изолирующие свойства [25]. Необходимы исследования изменений свойств глин в результате одновременного радиационного воздействия и активизации микробиологической деятельности, роли вторичных минералов и пр.

5) Тектоника и сейсмичность

Рассматриваемый район в достаточной степени соответствует этому критерию – для него характерна низкая тектоническая и сейсмическая активность. Общая региональная характеристика, естественно, ещё далеко не достаточна для оценок негативных последствий тектоно-сейсмических воздействий на подземное хранилище.

Необходимо учесть и проанализировать изначальные ограничения, связанные с особенностями тектоники района и структуры нижнекембрийских глин:

- исключается размещение хранилища над границами тектонических блоков фундамента, тектонических разломов и зон оперяющих их трещин;
- ограничивается возможность использования для строительства кровлевых участков пласта глин со следами палеовыветривания и в местах возможной миграции радионуклидов по тектоническим или литологическим трещинам;
- присутствие в глинах литологических и тектонических трещин создает трещиновато-блочную структуру, свойственную скальным породам, для которых существует методический и практический опыт анализа и разработки локальных критериев в условиях структурных неоднородностей [41, 42];
- при оценках сейсмической опасности экономически развитого, насыщенного крупными искусственными сооружения и энергетическими установками Ленинградского региона должны быть проанализированы современные представления о наведённых и техногенных факторах, инициирующих сейсмические события [43].

6) Геологические ресурсы территории

Глины являются сырьевым материалом, однако их запасы настолько велики, что выделение горного отвода для хранилища не нанесет серьёзного ущерба их ресурсам.

В качестве инженерно-геологических и геоэкологических критериев для выбора площадок предлагалось рассматривать реальные, в основном негативные, характеристики особенностей строения, состава и свойств нижнекембрийских глин по результатам исследований Санкт-Петербургского государственного горного института [25]. Представленные материалы сформулированы не в ранге критериев, а как перечисление направлений обязательного изучения глин, результаты которых дадут оценку этих пород в качестве среды для изоляции РАО.

Выполнение условий базовых критериев для оптимизации выбора площадок является в какой-то степени пассивным процессом оценки существующих геологических сред конкретного региона. Активной и, что весьма существенно, управляемой, составляющей системы подземной изоляции являются инженерно-технологические барьеры. Последние могут в значительной степени компенсировать недостатки нижнекембрийских глин как среды изоляции для такого приемлемого варианта, как, например, контролируемое хранение. Существуют благоприятные возможности использования в составе многобарьерной защиты местных сырьевых материалов: бентонитовых глин Пикалевского месторождения [15], железомарганцевых конкреций Финского залива [8].

7. Обзор перспективных участков

Основным объектом начальных поисковых работ 1991-1992 гг. и последних разработок ПГО «Невскгеология» и ВНИПИЭТ является пласт пологозалегающих нижнекембрийских глин в пределах наблюдаемой 30-километровой зоны ЛАЭС. В зависимости от его положения в геологическом разрезе (выходит на поверхность, перекрыт более поздними осадочными породами) планировалось сооружение соответствующих типов хранилищ: приповерхностных траншей или заглубленных камер.

Комплексные геологические исследования в требуемых объемах и уровнях детализации еще не проведены. В существующей ситуации целесообразно указать расположение наиболее перспективных участков и дать обзор имеющихся материалов по свойствам нижнекембрийских глин.

Площадь развития нижнекембрийских глин, выделенная в 1988-1990 гг., осталась в числе наиболее перспективных для детальных исследований (рис. 4). Она располагается в 12-19 км южнее г. Сосновый Бор, между поселками Копорье и Глобицы. Северная часть площади расположена на нижнекембрийских глинах Предглинтовой низменности, южная – на ордовикских известняках северо-западного ограничения Ижорского плато. По центральной части площади проходит крутой (угол склона до 15°) уступ кембрийско-ордовикского глинта, в нижней части которого на поверхность выходят нижнекембрийские глины, мощность которых у пос. Копорье составляет 90 м. Глины подстилаются кембрийскими песчаниками ломоносовского водоносного горизонта, выходящего на поверхность на севере вблизи г. Сосновый Бор. Перекрываются глины песчаниками, диктионемовыми сланцами, глауконитовыми песчаниками ордовика, которые в свою очередь сменяются вверх по разрезу известняками и мергелями того же возраста. По склонам глинта и в бортах долин ручьев располагаются родники, питающиеся за счёт подземных вод ордовикского комплекса.

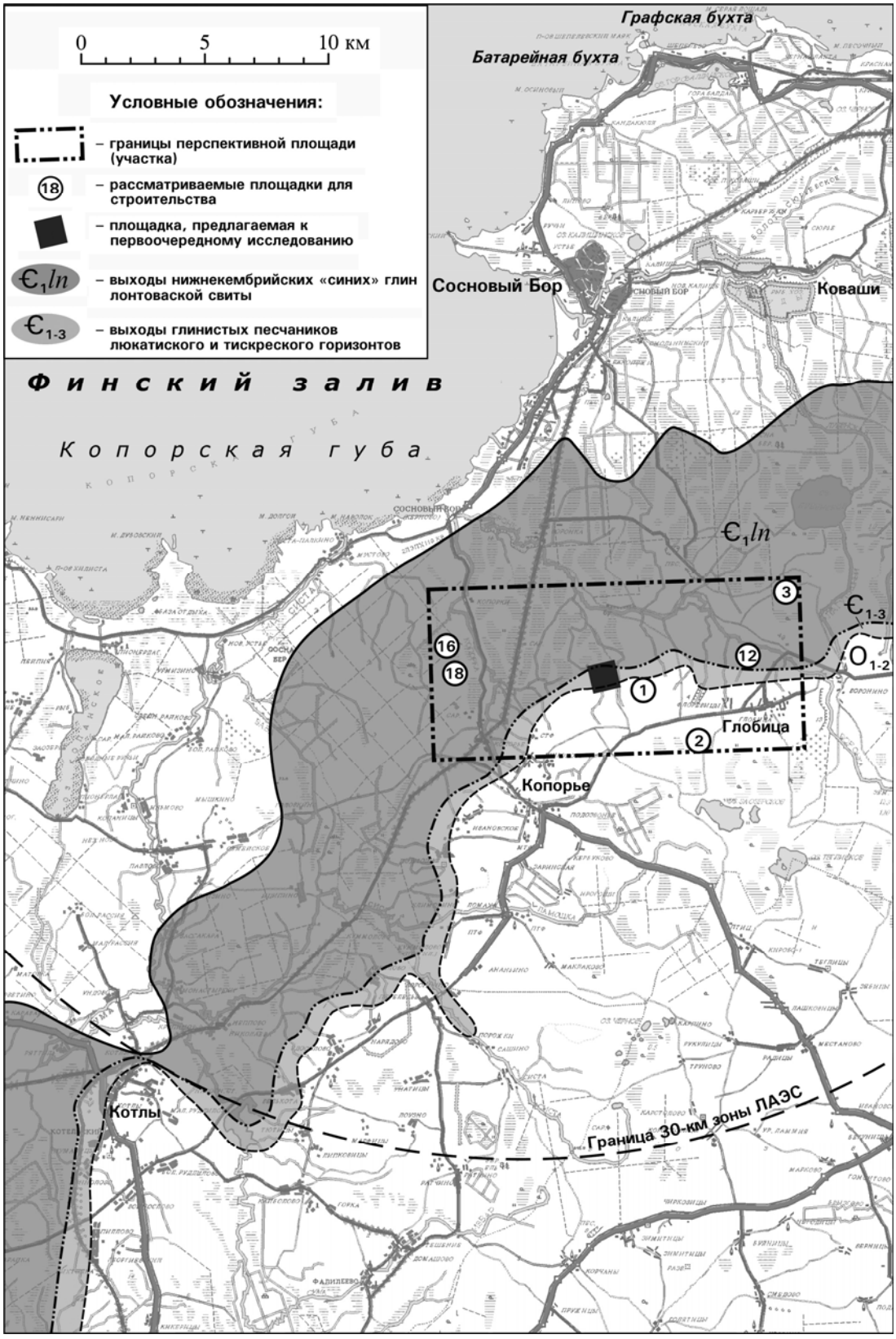


Рис. 4. Местоположение перспективной площади для размещения хранилища РАО.

В 1989 г. ПГО «Невскгеология» и Радиевым институтом в пределах перспективной площади были выделены 6 участков, на одном из которых, несмотря на ак-

тивный протест местных властей и населения, было проведено пробное разбуривание на площадке № 18.

В 1994 г. ГГП «Невскгеология» и ВНИПИЭТ провели предпроектные исследования в центральной части 30-километровой зоны ЛАЭС и выделили территорию в полосе глинта общей площадью 100 тыс. м^2 для строительства хранилища на глубине 100 м от поверхности известнякового уступа [39].

8. Основные свойства глин

Нижнекембрийские глины имеют морское происхождение. Однако режим осадконакопления не был постоянным, и наряду с глинистыми отложениями периодически формировались более грубозернистые осадки. Эта неоднородность отражается не только по литологическому разрезу, но и по различным местам опробования.

Далее приводятся экспериментальные данные изучения нижнекембрийских глин, отобранных в пределах рассматриваемого района побережья Финского залива, полученные в основном в Радиевом и Горном институтах, а также некоторыми другими организациями и авторами [44, 45].

Средние значения основных параметров глин мало отличаются от аналогичных пород, выбранных для подземной изоляции РАО в Бельгии и Великобритании [46] (табл. 3).

Таблица 3

Сравнительные характеристики глин

Параметры	Нижнекембрийские глины	Формация Бум, Бельгия	Формация Оксфорд, Великобритания
Объемная масса, т/м^3	2,04-2,31	1,9-2,1	2,21
Влажность, % масс.	11-24	15-22	15,7
Пористость, %	26-35	33	30
Коэффициент фильтрации, м/сут	10^{-5}-10^{-7}	10^{-5}	$5\cdot10^{-7}$

Более детальные исследования свидетельствуют, однако, о возможных изменениях тех или иных параметров глинистых толщ, связанных с их структурой и глубиной залегания. Коэффициент фильтрации по вертикальному направлению относительно напластования составляет в среднем $7{,}6\cdot10^{-6}$ м/сут, а по напластованию – $1{,}8\cdot10^{-5}$ м/сут. Влажность глин изменяется с глубиной, но после 17-18 м вариации составляют 15-18%. Более глубокие части пласта характеризуются уже достаточно постоянными значениями влажности и плотности, что свидетельствует о переходе к более высоколитофицированным и более однородным разностям. Максимальная влажность (до 30-37%) отмечается для зон тектонических нарушений.

По гранулометрическому составу нижнекембрийские глины классифицируются как алевритовые, реже – тяжелые алевритовые. Доля глинистой фракции в них составляет 30-60%, пылеватой – 40-50%, песчаной – крайне низкая.

По минералогической классификации глины относятся к монтмориллонит-гидрослюдистому типу. По химическому составу это малоглиноземистые глины с избытком кремнезема. Основная часть легких минералов представлена кварцем (до 74%), полевыми шпатами, хлоритом, глауконитом, слюдами и др. Тонкая фракция представлена в основном гидрослюдами с примесью каолинита и монтмориллонита.

Исследования ионно-солевого состава водных вытяжек показали весьма низкую засоленность этой миграционно-подвижной части пород, не более 0,24-0,28 г/л.

Установлено, что обменная способность глин не соответствует их минеральному и гранулометрическому составу, по которым эта величина должна быть выше полученных – 10,3-12,5 мг-экв/100 г. Предполагается, что низкие значения связаны с экранирующим эффектом плёнок органических соединений, покрывающих тонкодисперсные частицы породы, что снижает её обменную и сорбционную способность [25].

Однако удерживающаяся способность нижнекембрийских глин по отношению к радионуклидам лишь немного ниже, чем вермикулит-смектитовых глин формации Бум [46]. Для образцов из карьера «Красный Бор» коэффициенты распределения для стронция и цезия составили 10^2, америция – 10^3, плутония – 10^4. По результатам лабораторных экспериментов время «задержки» для диффузионного переноса через слой глины мощностью 1 м оценивается для цезия в 5000 лет, стронция – 300 лет, плутония – 50000 лет. Необходимо отметить, что при этом авторы исследований отмечали ограниченность получаемых данных и невозможность переноса информации для небольших образцов породы на неоднородный массив глин. Последующее изучение нижнекембрийских глин определило влияние масштабного эффекта на их физико-механические свойства [24] (табл. 4).

Таблица 4

Влияние масштабного эффекта на прочность и деформационную способность глин

Параметры	**Площадь образца, см^2**	
	20-26,5	**98**
Прочность на одноосное сжатие, МПа	0,70-0,92	0,105-0,140
Модуль общей деформации, МПа	14-20	3-6

Дополнительные коррективы в определение барьерных свойств нижнекембрийских глин внесет их структурная трещиноватость. Однако к настоящему времени еще нет адекватной информации, полученной в натурных условиях, а большинство лабораторных экспериментов проводилось, как правило, для верхних частей пласта глин. Остаются невыясненными свойства трещиноватого массива с высокими емкостными характеристиками и с пленками минералов – природных сорбентов – на плоскостях разрывных нарушений.

Определенные противоречия возникают при изучении изменения микробиологической деятельности под влиянием ионизирующих излучений. В нижнекембрийских глинах, отобранных из подошвы хранилища природных низкоактивных отходов, установлено возрастание бактериальной массы, по сравнению с фоновыми значениями [25]. В песчано-глинистых породах зоны радиационного загрязнения Ленспецкомбината «Радон» концентрации белка не отличаются от средних значений по области, но «все белковые клетки находятся в мертвом состоянии» [27]. По-видимому, нельзя распространять на весь пласт и на условия подземного захоронения РАО результаты изменения параметров физических свойств нижнекембрийских глин по тем же пробам из подошвы хранилища отходов комбината г. Силламяэ [25]. Вопросы микробиологической деятельности, развитие дефектов в структуре минералов, радиолиз поровых вод и пр. для подземного хранилища в нижнекембрийских глинах весьма существенны и ещё требуют своего решения. При этом натурные испытания должны быть проведены так, чтобы их результаты можно было перенести на предполагаемый объем пород будущего хранилища.

Заключение

1. Проведенные за последнее время исследования подтверждают сделанный ранее вывод [5, 6] о перспективности пласта нижнекембрийских глин для строительства регионального хранилища радиоактивных материалов. Сохраняется оценка участка, выделенного для проведения детальных поисково-разведочных и исследовательских работ (Копорье – Глобицы).

2. Актуальной задачей является разработка концепции обращения и изоляции РАО для Ленинградского региона, базирующаяся на кадастре радиоактивных материалов и результатах предварительного исследования нижнекембрийских глин. В концепции должны быть учтены различные аспекты общей проблемы улучшения экологической обстановки региона: социального (негативное отношение населения к строительству), организационно-технического (многолетний радиационно-экологический мониторинг побережья Финского залива) и т. п.

3. Продолжение полевых и лабораторных исследований на перспективных площадках необходимо направить на разработку дополнительных (региональных, локальных) критериев безопасности выбора площадок для подземной изоляции РАО.

4. Необходимо разработать программу наиболее актуальных натурных исследований в полевых условиях и в подземной исследовательской лаборатории – первой очереди строительства подземного хранилища.

Литература

1. Довгуша В. В., Тихонов М. Н. Радионуклиды в пространстве Северо-Западного региона России: системный взгляд на проблему / Экологическая экспертиза, ВИНИТИ. – М., 2002, вып. 4, с. 29-70.
2. Лебедев В. И. Ленинградская АЭС: генеральный курс – безопасность / НТС «Экология и атомная энергетика». Спецвыпуск. – Сосновый Бор : Изд-во ЛАЭС, 1998, с. 8-11.
3. Блинова Л. Д., Душин В. Н. Анализ закономерностей загрязнения приземного воздуха радионуклидами при длительной эксплуатации (1982-2002 гг.) радиационно-опасных объектов на российском побережье Балтики / Труды Радиевого ин-та им. В. Г. Хлопина. – СПб., 2003, т. X, с. 80-91.
4. Охрана окружающей среды, природопользование и обеспечение экологической безопасности в Санкт-Петербурге в 1998 году. СПб. : Администрация Санкт-Петербурга, с. 365-377.
5. Проблема размещения радиоактивных отходов в геологические формации ленинградского региона : Препринт РИ-230 / Под. ред. д. х. н. А. С. Кривохатского. – М. : ЦНИИатоминформ, 1991. – 26 с.
6. Кривохатский А. С., Дубровин В. С., Рогозин Ю. М. и др. О возможности создания хранилища радиоактивных отходов в залежах глин в Ленинградской области. Материалы Международной конференции «Использование подземного пространства страны для повышения безопасности ядерной энергетики». – Апатиты, 1995, ч. 3, с. 34-40.

7. Природа Ленинградской области и её охрана / Сост. Т. И. Миронова, Э. А. Слепян. Л. : Лениздат, 1983. – 277 с.
8. Жамойда В. А., Москаленко П. Е., Рыбалко А. Е. и др. Минерально-сырьевые ресурсы восточной части Финского залива / Разведка и охрана недр, 1998, № 7-8, с. 26-30.
9. Усенков С. М., Ситников Т. А. Геоэкологические аспекты донных осадков Ладожского озера / Литология и полезные ископаемые, 1997, № 6, с. 649-660.
10. Литосфера Центральной и Восточной Европы: Восточно-Европейская платформа / Отв. ред. В. Б. Сологуб. Киев : Наукова думка, 1989. – 188 с.
11. Геологическая карта СССР. Масштаб 1:1 000 000 (новая серия). Объяснительная записка. Лист О-(35), 36. – Л., 1989. – 212 с.
12. Полевая Н. И., Казаков Г. А., Мурина Г. А. Глаукониты как индикатор геологического времени / Труды 7-ой сессии Комисии по определению абсолютного возраста геологических формаций. – М. : Изд. АН СССР, 1960, с. 419-429.
13. Войткевич Г. В. Проблемы радиогеологии. М. : Госгеолтехиздат, 1961. – 351 с.
14. Проскуряков В. В., Николаев Ю. В., Стуккей Г. А. и др. Геологическая среда Ленинградской области и Санкт-Петербурга и её значение в решении хозяйственных и социальных проблем / Разведка и охрана недр, 1998, № 7-8, с. 21-23.
15. Харлашин А. П., Шатков Н. Г., Уткина Н. Е. Первая находка бентонитов на северо-западе России / Там же, с. 23-27.
16. Воронов А. Н., Барвиш М. В., Шварц А. А. Особенности микрокомпонентного состава подземных вод нижнекотлинского горизонта / Разведка и охрана недр, 1998, № 7-8, с. 40-41.
17. Грейсер Л. Е. Формирование ресурсов подземных вод Ижорского месторождения / Формирование ресурсов и состава подземных вод : Записки Ленинградского горного института. – Л., 1991, т. 129.
18. Гидрогеология СССР. Т. 3: Ленинградская, Псковская и Новгородская области / Под ред. И. К. Зайцева. – М. : Недра, 1967.
19. Скопенко Н. Ф., Иванов А. И., Скороспелкин С. А. и др. Перспективы алмазоносности зоны сочленения Балтийского щита и Русской плиты / Разведка и охрана недр, 1998, № 7-8, с. 31-32.
20. Скороспелкин С. А. Геотектоническое развитие и перспективы алмазоносности Восточно-Европейской платформы / Геология и геофизика, 1992, № 10, с. 25-31.
21. Кабаков Л. Г., Скопенко Н. Ф. Оценка геодинамического состояния территории Ленинградской области / Там же, с. 32-35.
22. Медведев Н. И. Модель колебаний блоков земной коры после землетрясения / Геология и геофизика, 1986, № 4, с. 76-83.
23. Гарбар Д. И., Головизнин С. А., Трофимов О. В. Геодинамика зоны сочленения Балтийского щита и Русской платформы / Советская геология, 1992, № 7, с. 42-50.
24. Дашко Р. Э., Еремеева А. А. Инженерно-геологические особенности коренных глин Санкт-Петербурга как среды для размещения подземных сооружений / Материалы Международного симпозиума «Инженерно-геологические проблемы урбанизированных территорий». – Екатеринбург : «Аква-Пресс», 2001, с. 675-682.

25. Еремеева А. А. Инженерно-геологическая и геоэкологическая оценка условий захоронения промышленных отходов в нижнекембрийских глинах Ленинградской области : Дисс. СПб. : ГГИ им. Г. В. Плеханова, 2002 .
26. Калиберда И. В., Левин А. Г., Мурлис Д. В. и др. Внешние воздействия природного происхождения на глубинные захоронения долгоживущих радиоактивных отходов / Атомная техника за рубежом, 2003, № 2, с. 3-7.
27. Дашко Р. Э., Норова Л. П., Руденко Е. С. Эволюция геоэкологического состояния подземного пространства Санкт-Петербурга / Разведка и охрана недр, 1998, № 7-8, с. 57-59.
28. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации (ОСР-97) – М., ОПФЗ РАН, 1998.
29. Беклемишев А. Б., Буданов В. Г., Верба М. Л. и др. Изучение активных внутриплитных разломов земной коры с целью снижения экологических угроз / Разведка и охрана недр, 1998, № 7-8, с. 70-71.
30. Принципы безопасности и технические критерии для подземного захоронения радиоактивных отходов высокого уровня активности. / МАГАТЭ. Серия безопасности, № 99. – Вена, 1990.
31. Ядерный топливный цикл за рубежом. / М. : ЦНИИатоминформ, 2000. – 160 с.
32. Масуда С., Умэки Х., Найто М. Надёжность захоронения отходов высокой активности в подземные хранилища глубокого заложения в Японии / Атомная техника за рубежом, 2001, № 2, с. 21-30.
33. Debating Yucca Mountain. Nuclear Engineering International, v. 46, No 564, p. 26-29.
34. Свемар Кристер. Выбор площадок для глубокого геологического захоронения. / Российско-шведский семинар по проблемам обращения с РАО и ОЯТ. Санкт-Петербург, 20-24 января 2003 г.
35. Оценка влияния атомно-промышленного комплекса на подземные воды и смежные природные объекты (г. Сосновый Бор Ленинградской области) / Под ред. В. Г. Румынина. – СПб. : СПбГУ, 2003. – 248 с.
36. Брызгалова Р. В., Нечай Г. Н., Рогозин Ю. М. и др. Проблема размещения радиоактивных отходов в геологические формации Северо-Западного региона / II Международная конференция «Радиационная безопасность: радиоактивные отходы и экология». Тезисы докладов. Санкт-Петербург, 9-12 ноября 1999 г., с. 7-8.
37. Criteria for Underground Disposal of Solid Radioactive Wastes / IAEA Safety Series No 60, 1983.
38. Решетов В. В., Громов Ю. А., Кривохатский А. С. и др. Технико-экономическое обоснование строительства пункта захоронения РАО и объектов, загрязненных в результате чернобыльской аварии. – СПб. : ВНИПИЭТ, 1993.
39. Якушев М. Ф., Мартынов Е. М. Выбор типа и варианта размещения регионального хранилища для окончательного захоронения радиоактивных отходов на Северо-Западе России / Экология и атомная энергетика. – Сосновый Бор : Изд-во ЛАЭС, 1999, вып. 2.
40. Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation. / Third Worldwide Review. Ed. P. A. Witherspoon, G. S. Bodvarsson. Earth Sci. Div., USA, 2001, p. 335.

41. Мельников Н. Н., Конухин В. П., Каспарьян Э. В. и др. Анализ условий строительства хранилищ радиоактивных отходов в скальных массивах островов Северного Ледовитого океана / Материалы Международной конференции «Использование подземного пространства страны для повышения безопасности ядерной энергетики». – Апатиты, 1995, с. 41-53.
42. Андерсон Е. Б., Савоненков В. Г., Шабалев С. И. Разработка геологической концепции и геологических критериев захоронения радиоактивных отходов в гранитоидных формациях (на примере Нижнеканского массива Енисейского кряжа) : Препринт РИ-255 / М. : ЦНИИатоминформ, 2000. – 28 с.
43. Жигалин А. Д., Николаев А. В. Сильное воздействие на литосферу как причина техногенных и природных катастроф / Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. М. : ВИНИТИ, 2003, Вып. 3, с. 109-117.
44. Сохранский В. Б., Щустров В. П., Смирнов В. И. и др. Опыт создания и эксплуатации герметичных подземных резервуаров в глинах как прототип хранилища радиоактивных отходов: Препринт РИ-230 / Под ред. А. С. Кривохатского. – М. : ЦНИИатоминформ, 1991, с. 22-23.
45. Архангельский И. В. Геологические аспекты строительства хранилищ радиоактивных отходов на северо-западе России / Геоэкология, 2001, № 5.
46. PAGIS Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste: Summary. EUR 11775 EN, Luxembourg, 1988. – 270 p.
47. Volckaert G. and Gautschi A. Field Tracer Experiment in Clays. NEA/EC GEOTRAP Workshop “Field Tracer Experiments: Role in the Prediction of Radionuclide Migration”, Cologne, Germany, 1996, p. 95-106.

Prospects for creation of underground radioactive waste repositories in Lower Cambrian clays of Leningrad Region

E. B. Anderson, V. G. Savonenkov, S. I. Shabalev

Creation of a modern point for radioactive waste disposal is the important condition for both industry development and radiation safety in Leningrad Region. Data on Lower Cambrian clays in southwestern part of Leningrad Region are summarized. These clays are considered as a promising geological formation for disposal of radioactive wastes generated in North-West Economical Region of the Russian Federation. Physical-geographic, socio-economic, geologic, tectonic and other features of Leningrad Region are considered. The earlier drawn conclusions about suitability of these Lower Cambrian clays for placement of the regional radioactive waste repository. The main near-term tasks for both detailed study and suitability estimation of the formation as a medium for the repository construction are determined.

Синтез кристаллических матриц для иммобилизации актиноидов

Б. Е. Бураков, Е. Б. Андерсон, М. В. Заморянская, В. М. Гарбузов,
А. А. Кицай, В. А. Цирлин, А. Ю. Алексеев

Основными целями исследования были выбор, научное обоснование и разработка оптимальных методов синтеза наиболее устойчивых материалов, пригодных для окончательной иммобилизации самых опасных долгоживущих радионуклидов, включая избыточный оружейный плутоний ^{239}Pu, актиноидную фракцию высокорадиоактивных отходов (Pu, Np, Am, Cm). Предложены различные варианты окончательной иммобилизации, включая захоронение в глубинные геологические формации, трансмутацию и использование в качестве минералоподобного ядерного топлива (^{239}Pu).

Концепция использования кристаллических материалов для иммобилизации ВАО развивалась многочисленными исследователями с тех пор, как впервые была предложена в 1953 г. Однако большинство разработок (например, синрок) осуществлялось в расчете на иммобилизацию неразделенной смеси ВАО. Существующие в России технологии предполагают переработку облученного ядерного топлива и разделение высокоактивных отходов на фракции, что требует нового подхода к созданию кристаллических форм отверждения. Основное внимание было уделено разработке и тестированию кристаллических форм отверждения редкоземельно-актиноидной фракции ВАО и иммобилизации оружейного плутония.

Работы, проведенные в Радиевом институте, продемонстрировали принципиальную возможность иммобилизации актиноидно-редкоземельной фракции ВАО в монофазную керамику на основе кубической модификации диоксида циркония. Изучена возможность иммобилизации плутония и актиноидов в матрицу на основе циркона $ZrSiO_4$. Устойчивость циркона в различных геохимических средах в течение миллиардов лет является лучшим свидетельством в пользу перспективности разработок кристаллических матриц на его основе.

Введение

Радиевый институт им. В. Г. Хлопина (РИ) проводит исследования в области переработки радиоактивных отходов уже многие годы, основываясь на российской технологии разделения высокоактивных отходов (ВАО) [1-3]. Эта технология использует остекловывание как метод переработки Cs-Sr-фракции ВАО и создает условия для более эффективной иммобилизации актиноидной (трансурановой) фракции в прочной керамике. Существуют также актиноидсодержащие отходы сложного химического состава, полученные в результате производства ядерного оружия в России и США. Такие отходы не могут быть переведены в обычные типы керамики, однако кристаллическая форма также может быть использована для их иммобилизации. Начиная с 1990 года Радиевым институтом были изучены различные типы кристаллических матриц, пригодные для иммобилизации трансурановых и других долгоживущих радионуклидов, с сохранением технологии остекловывания только для переработки Cs-Sr-фракции высокорадиоактивных отходов (рис. 1) [25].

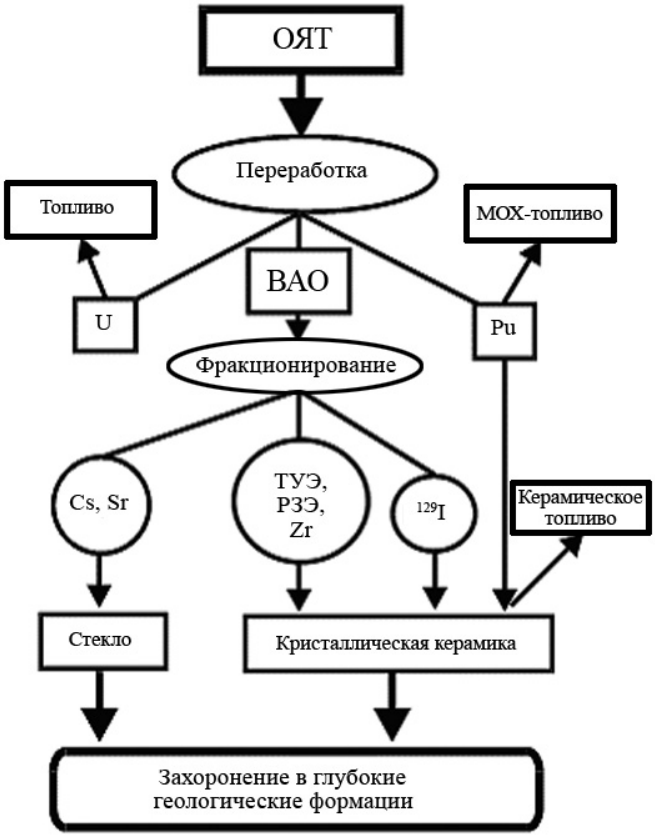


Рис. 1. Схематичная версия подхода Радиевого института им. В. Г. Хлопина к иммобилизации ВАО [25].

Теоретические и экспериментальные исследования позволили выбрать циркон (Zr, An)SiO_4 (где An = U, Pu, Np, Am, Cm) как одну из наиболее устойчивых матриц для иммобилизации актиноидов, в частности избыточного оружейного плутония [6-9, 11-13, 15, 16, 20]. Кроме того, было обнаружено, что аморфный гидросиликат циркония (АГСЦ), используемый в качестве сырья для синтеза циркона методом золь-геля, также является химически прочным материалом, имеющим устойчивый природный аналог – «гель-циркон» [17, 18]. Таким образом, в некоторых случаях возможна предварительная стабилизация актиноидных отходов уже на стадии подготовки исходного сырья. Другая актиноидсодержащая матрица, диоксид циркония (Zr, An,…)O_2, была выбрана Радиевым институтом на основе опубликованных данных [4, 5, 8-10, 13-16].

В дополнение к химической и тепловой устойчивости выбор диоксида циркония основан на следующем:

- структура диоксида циркония позволяет включать актиноиды различных валентных состояний;
- он может быть использован для многофазной керамики в комбинации с цирконом [8, 13, 15, 16] и алюминатами [10] или как монофазная оксидная циркониевая керамика [4, 5, 8, 9, 13, 14, 23-26] в зависимости от целей использования последней;

- кубический диоксид циркония может быть стабилизирован допированием Pu и использован как керамическая форма отходов для трансурановых элементов (ТУЭ), а также как керамическое ядерное топливо [4, 13, 14, 23];
- циркониевые оболочки от переработанного отработанного топлива – «избыточный» источник циркония для синтеза оксидной циркониевой керамики.

Четвертый тип кристаллической керамики на основе граната и перовскита, $(Y, Gd, Ca, Fe,\ldots)_3(Al, Ga, Fe,\ldots)_5O_{12}$ и $(Y, Gd, Ca,\ldots)(Al, Ga, Fe,\ldots)O_3$ [21, 22], рассматривается в Радиевом институте в качестве матрицы для иммобилизации актиноидсодержащих отходов сложного химического состава. Такие отходы могут содержать (в вес.%): Pu – от 30 до 88, U – до 20, Am – до 5, Th – до 5, а также Al, Ca, C, Cr, Ga, Cl, Fe, K, Na, Ni, Si, Sr, Ta, W и Zn в различных соотношениях [22]. Предполагается, что комбинация граната с перовскитом обеспечивает возможность включения в их решетки почти всех разновалентных актиноидов и большинства нерадиоактивных элементов без образования самостоятельных актиноидных фаз. Дополнительная привлекательная особенность гранат/перовскитовой керамики состоит в том, что она может быть синтезирована методом плавления. Сводные данные по исследованиям Радиевого института в области иммобилизации актиноидсодержащих отходов представлены на рис. 2 [25]. Необходимо отметить, что в настоящее время Росатом не позволяет рассматривать избыточный оружейный плутоний в качестве отходов и требует его иммобилизации в качестве ядерного топлива. Таким образом, данное обстоятельство обеспечит в будущем возможное применение керамического плутониевого топлива на основе диоксида циркония и как формы отходов.

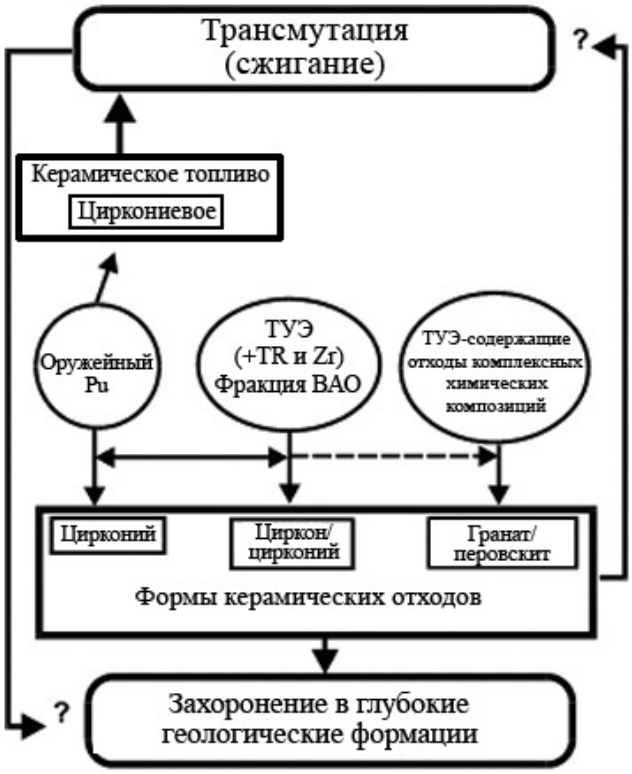


Рис. 2. Общая схема применения керамики для иммобилизации актиноидных (трансурановых) отходов [25].

В настоящее время Лаборатория прикладной минералогии и радиогеохимии Радиевого института проводит исследования керамик, допированных ^{239}Pu, ^{238}Pu, ^{241}Am, ^{237}Np и другими актиноидами. С этой целью в лаборатории был создан комплекс оборудования (рис. 3-5) для синтеза высокорадиоактивных образцов. Были получены разнообразные типы керамик, содержащие от 5 до 37 вес.% ^{239}Pu, 12 вес.% ^{238}Pu, 0,2 вес.% ^{241}Am (рис. 6).

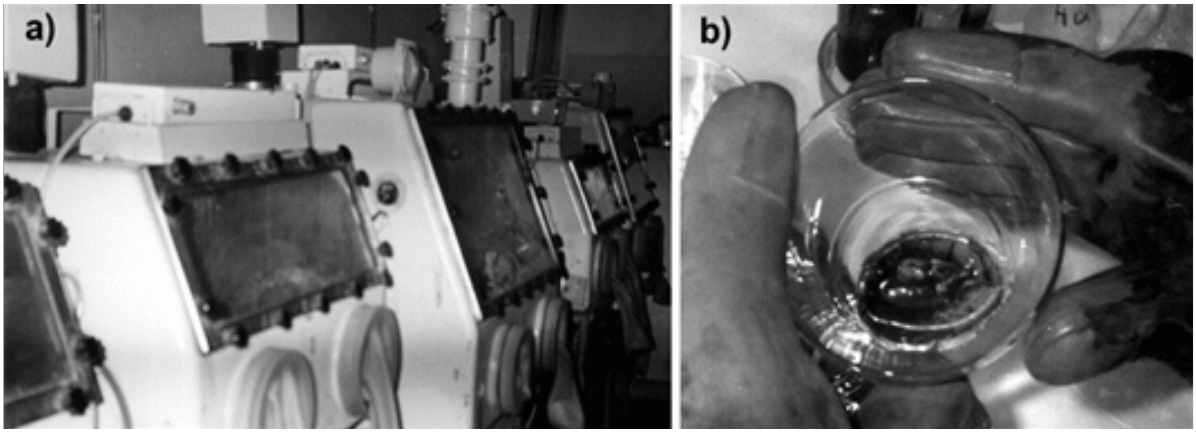


Рис. 3. a) цепь перчаточных боксов для приготовления шихты и синтеза образцов керамики, допированной Pu;
b) отвержденный гель, содержащий ~1 г ^{239}Pu (в пересчете на металл) для синтеза силикат-оксидной циркониевой керамики.

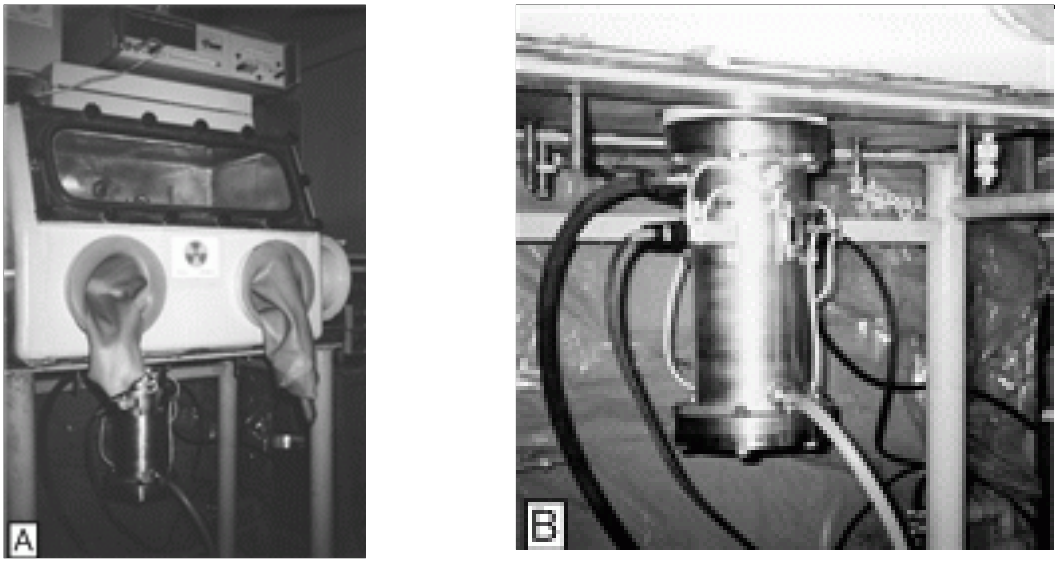


Рис. 4. Печь № 1, установленная в перчаточном боксе для синтеза керамики на воздухе: A – общий вид; B – крупный план.

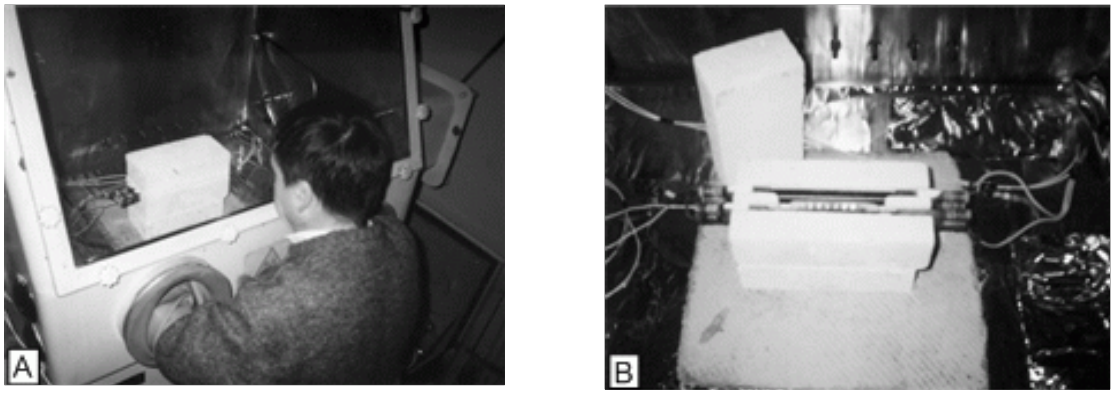


Рис. 5. Печь № 2, изготовленная из пористого корунда для синтеза керамики на воздухе:

А – общий вид; В – открытая печь с таблетками плутониевой керамики на платиновой фольге.

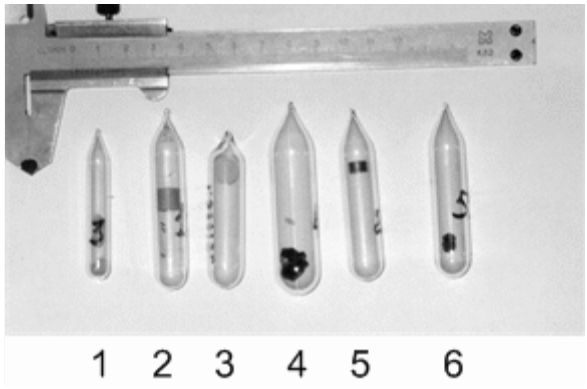


Рис. 6. Некоторые образцы допированной Pu керамики:

1 и 2 – циркон/диоксид циркония (ZIR-1 и ZIR-3); 3 – диоксид циркония (Z-1); 4 – отвержденный прокаленный гель (аморфный гидросиликат циркония – исходная шихта для синтеза керамики на основе циркон/диоксид циркония); 5 – пирохлор (P-1); 6 – расплавившийся пирохлор (P-2).

Радиевый институт также разрабатывает керамику на основе турмалина и фуллеренсодержащих материалов для иммобилизации ^{129}I. Данный отчет суммирует наиболее важные результаты экспериментальной работы. Основная цель – показать, что в настоящее время имеются все необходимые условия для проведения экспериментов по синтезу керамики с использованием не только имитаторов, но и реальных актиноидов и других радионуклидов.

1. Керамика на основе циркона и диоксид циркония

Основная проблема синтеза актиноидсодержащей кристаллической керамики заключается в обеспечении полного включения актиноидов в кристаллическую структуру матрицы. При использовании горячего прессования и методов прокаливания трудно избежать ситуации, когда остаются непрореагировавшие актиноидные фазы. В наших экспериментах мы стремились решить эту проблему, используя следующие типы шихт:

- аморфный гидросиликат циркония (АГСЦ), допированный 10 вес. % Me = Pu, U, Ce, Gd. АГСЦ получен методом золь-геля [18, 20], который обеспечивает полную гомогенность шихты на молекулярном уровне. Во всех случаях состав твердого геля (рис. 7) характеризуется избытком диоксида циркония для обеспечения конечной стехиометрии циркона (Zr, Me)SiO_4 (80,0-99,5 вес. %) и диоксида циркония (Zr, Me)O_2, 0,5-20,0 вес.%;
- смесь коммерческих порошков: $Zr_{метал.}$, $SiO_{2\ аморф.}$, U_3O_8. Использование порошка металлического Zr предпочтительнее благодаря его более высокой химической активности по сравнению с ZrO_2 [7, 8, 13, 16];
- смесь коммерческих порошков $SiO_{2\ аморф.}$ и избытка Ce-содержащего диоксида циркония, полученного в результате плазменной кальцинации соосажденных Ce-Zr оксалатов.

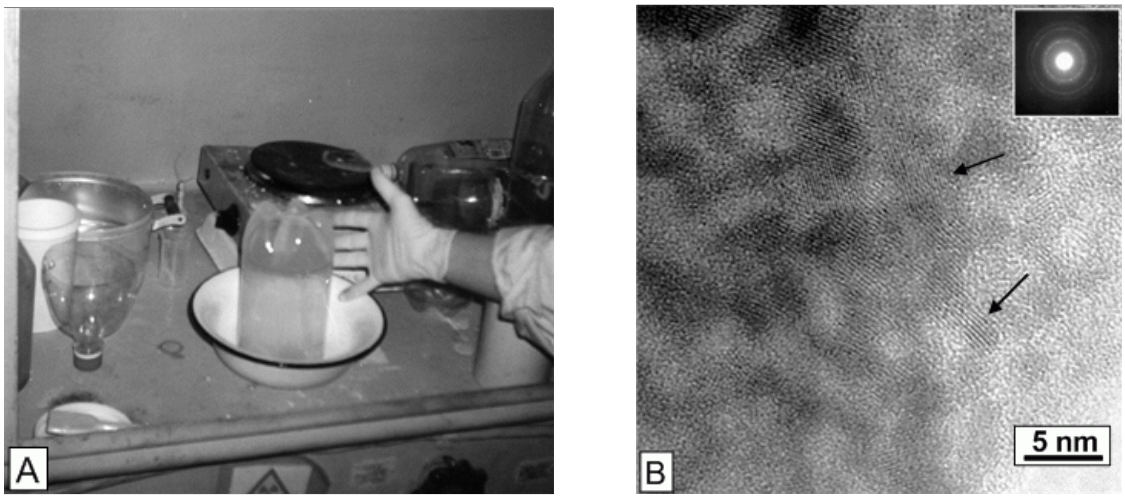


Рис. 7. Аморфный гидросиликат циркония (АЦГС) для синтеза керамики на основе циркон/диоксида циркония:

A – общий вид сырого допированного ураном геля (прозрачен и гомогенен, в матрице отсутствуют включения или осадки);
B – электронное изображение допированного Ce АЦГС с аморфной матрицей, содержащей отдельные кристаллиты (отмечено). Вставленные картины электронной дифракции показывают слабую кристалличность.

Шихта допированного Ce АГСЦ была подвергнута горячему прессованию в графитовой форме на воздухе при давлении P=25 MPa и температурах 1300, 1400, 1500 °C в течение 1 ч. Допированная Ce шихта на основе $Zr_{метал.}$ была также подвергнута горячему прессованию в графитовой форме на воздухе в течение 1 ч при P=25 MPa и T=1400 °C.

Шихты всех составов были подвергнуты холодному прессованию и прокалены на воздухе при следующих условиях:

- допированный Ce АГСЦ: T=1300, 1400, 1450, 1500, 1600 °C, время = 1 ч;
- допированный Gd АГСЦ: T=1400, 1500, 1600 °C, время = 1 ч;
- допированный U АГСЦ: T=1400, 1500 °C, время = 1 ч;
- шихта на основе металлического Zr: T=1500 °C, время = 1 ч;
- шихта на основе Ce-Zr оксалатов, прошедших плазменную кальцинацию (с содержанием Ce 10 вес.%): T=1600-1620 °C, время =1 ч;
- шихта на основе соосажденных Ce-Zr-Gd оксалатов (с 10 вес. % Ce и 21 вес.% Gd): T=1000 °C, время = 1 ч.

Допированный ураном циркон синтезировали из АГСЦ гидротермальным методом при T=350 °C, давлении 15-20 MPa в течение 6 ч. В одном эксперименте валентность урана была стабилизирована как 4+ добавкой порошка $Zr_{метал.}$ в реакционную воду, в другом эксперименте окислительные условия не контролировались и валентность урана предполагалась равной 6+.

Все образцы исследовались рентгеновским диффракционным методом, сканирующей электронной микроскопией; некоторые образцы керамики на основе циркон/диоксида циркония были также изучены просвечивающей электронной микроскопией.

Из шихт всех типов были получены монолитные образцы керамики, за исключением шихты на основе порошка $Zr_{метал.}$, прокаленного на воздухе. Шихта на основе $Zr_{метал.}$ была успешно использована для синтеза допированной Ce циркон/диоксидциркониевой керамики осевым прессованием (рис. 8), однако его возможное применение для синтеза керамики методом прокаливания требует дополнительного изучения и проработки. Во всяком случае, шихта на основе $Zr_{метал.}$ позволяет обеспечить успешный синтез допированных ураном циркон/диоксидциркониевых матриц (рис. 9). Допированный Ce и Gd АГСЦ переводится в кристаллический материал посредством двух стадий: на первой стадии происходит образование кристаллического Ce-Gd-содержащего диоксида циркония в матрице аморфного чистого диоксида кремния (рис. 10), а затем основная часть глобул диоксида циркония реагирует с диоксидом кремния с образованием циркона (рис. 11).

В случае шихты допированного Ce АГСЦ было обнаружено, что начало образования фазы циркона происходит при T=1300 °C при горячем прессовании и при T=1400 °C при прокаливании. Температурный интервал от 1500 до 1600 °C является оптимальным для полного выхода матриц циркона и диоксида циркония, синтезированных обоими методами. Тем не менее, наибольшее вхождение Ce в циркон, коррелирующееся с увеличением параметров решетки циркона, наблюдалось в интервале 1400-1500 °C для прокаленных образцов. Во всех случаях плотность полученной керамики была меньше, чем у чистого циркона (4,7 г/см^3), но у образцов после горячего прессования выше (3,9-4,4 г/см^3), чем у прокаленных образцов (3,7-3,9 г/см^3).

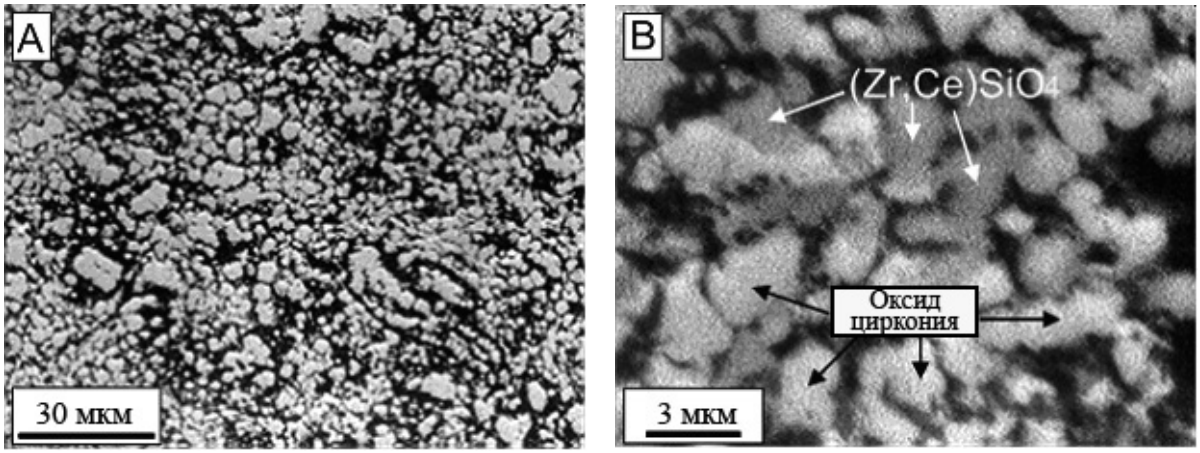


Рис. 8. Изображения в обратнорассеянных электронах допированной Ce керамики на основе циркон/диоксида циркония, полученной горячим прессованием (при T=1400 °C, P=25 MPa, t=1 ч) шихты на основе $Zr_{метал.}$ порошка.

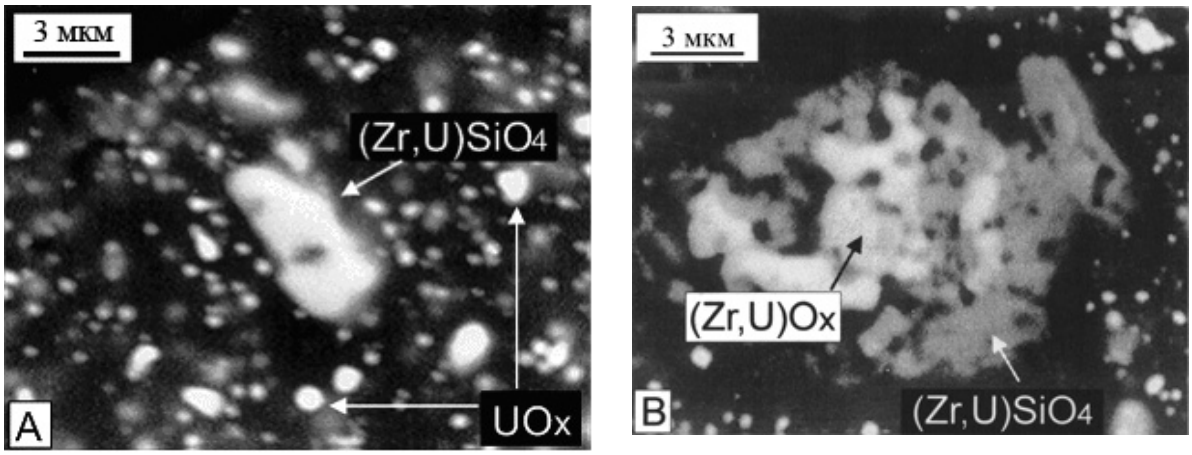


Рис. 9. Изображения в обратнорассеянных электронах допированной U керамики на основе циркон/диоксида циркония, полученной прокаливанием на воздухе (при T=1500 °C, t=1 ч) шихты на основе $Zr_{метал.}$ порошка.

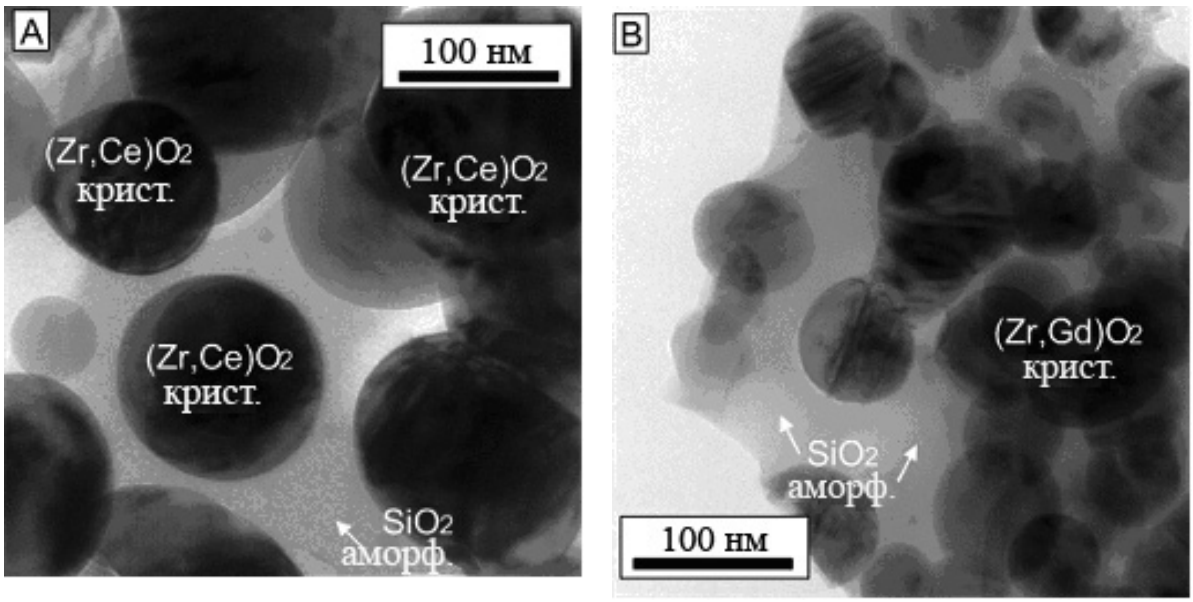


Рис. 10. Электронные изображения аморфного гидросиликата циркония, прокаленного на воздухе (T=1400 °C, t=1 ч): A – АГСЦ, допированный Ce; B – АГСЦ, допированный Gd. В обоих случаях кристаллизация АГСЦ начинается с образования глобул кристаллического диоксида циркония, хотя матрица диоксида кремния остается аморфной.

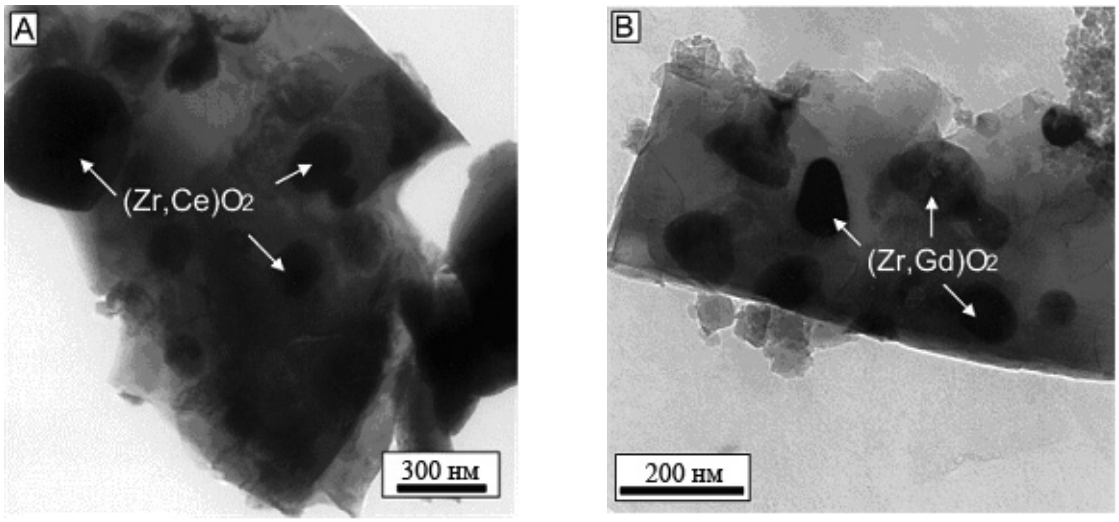


Рис. 11. Электронные изображения циркона, содержащего включения диоксида циркония. Керамики были получены прокаливанием АГСЦ на воздухе в течение 1 часа:

A – образец, допированный Ce (при T=1500 °C); B – образец, допированный Gd (при 1400 °C).

Для керамики, полученной из допированного Gd АГСЦ, не был достигнут полный выход циркона и диоксида циркония после 1 ч при 1400, 1500, 1600 °C, поскольку во всех образцах было обнаружено около 10-12 вес.% непрореагировавшего диоксида кремния в виде кварца или кристобалита. В то же время в матрице керамики не было обнаружено самостоятельных фаз гадолиния.

Прокаливание шихты АГСЦ, допированной ураном, в течение 1 ч при T=1400 и 1500 °C также не обеспечивает полного выхода циркон/диоксидциркониевых фаз. Важно отметить, что вхождение урана в циркон было низким, так как увеличение параметров решетки циркона было незначительным и обнаруженные в матрице керамики самостоятельные фазы урана составляли 1-3 вес. %.

Возможно, это было вызвано окислением урана от 4+ до 6+. Плазменная кальцинация АГСЦ вызвала образование в матрице аморфного чистого диоксида кремния кристаллического диоксида циркония (рис. 12), допированного Ce, U, Gd, – результат, близкий к продуктам прокаливания при T=1300-1400 °C в течение 1 ч (рис. 10). Дополнительное прокаливание АГСЦ, кальцинированного плазмой, дает более быстрый рост глобул диоксида циркония (рис. 13A), а затем циркона (рис. 13B) по сравнению с прокаливанием некальцинированного материала. После прокаливания шихты (при T=1600-1620 °C, 1 ч) на основе $SiO_{2аморф.}$ и Ce-Zr-оксалатов после плазменной кальцинации была получена керамика, состоящая из 40-45 вес.% циркона и 55-60 вес.% диоксида циркония, с плотностью 4,3 г/см^3 (рис. 14, 15B).

Церий распределился различно среди двух матриц: диоксид циркония содержал 6-8, а циркон – 3,5-4,5 вес.%. Необходимо подчеркнуть, что плазменная кальцинация Zr-Ce или Zr, Gd,… (рис. 16) происходит на стадии приготовления шихты, поэтому в процессе конечного синтеза керамики не остается непрореагировавших фаз с имитаторами актиноидов. Даже взаимодействие между (Zr, Ce)O_2 (Ce-Zr-оксалат после плазменной кальцинации) и силикатным расплавом не приводит к образованию самостоятельной фазы CeO_2 (рис. 15).

Полученные результаты синтеза керамики с использованием шихты АГСЦ, допированной Ce, U, Gd, показали, что поведение Ce, U и Gd в качестве имитаторов ТУЭ весьма различно. Типичный размер зерна (менее 2 мкм) отдельных фаз в матрице керамики не позволяет провести точный электронный микроанализ, однако, без сомнения, матрица диоксида циркония в целом включает большее количество этих имитаторов по сравнению с цирконом, который характеризуется неоднородным распределением имитатора в одном зерне. Интересно также отметить, что неоднородное распределение изоморфной примеси урана типично для кристаллов высокоуранового циркона из чернобыльской «лавы», хотя они были образованы в силикатном расплаве: содержание урана варьировало от 1-3 вес.% в центральных частях кристаллов до 10-12 вес.% в периферических и некоторых индивидуальных зонах [6].

Эксперименты по синтезу допированного ураном циркона гидротермальным методом показали, что кристаллическая решетка этой матрицы чувствительна к валентному состоянию урана. Хорошо ограненные кристаллы допированного ураном циркона были успешно синтезированы только тогда, когда в водном растворе была стабилизирована валентность урана 4+ (рис. 17A, B, C). В случае окислительных условий (при той же температуре синтеза) полученный урансодержащий циркон был слабо раскристаллизован (рис. 17D). Количественный EDS анализ показал, что в хорошо раскристаллизованном цирконе, содержащем U^{4+}, при тех же условиях значительно больше урана, чем в низкокристаллическом цирконе, допированном U^{6+}.

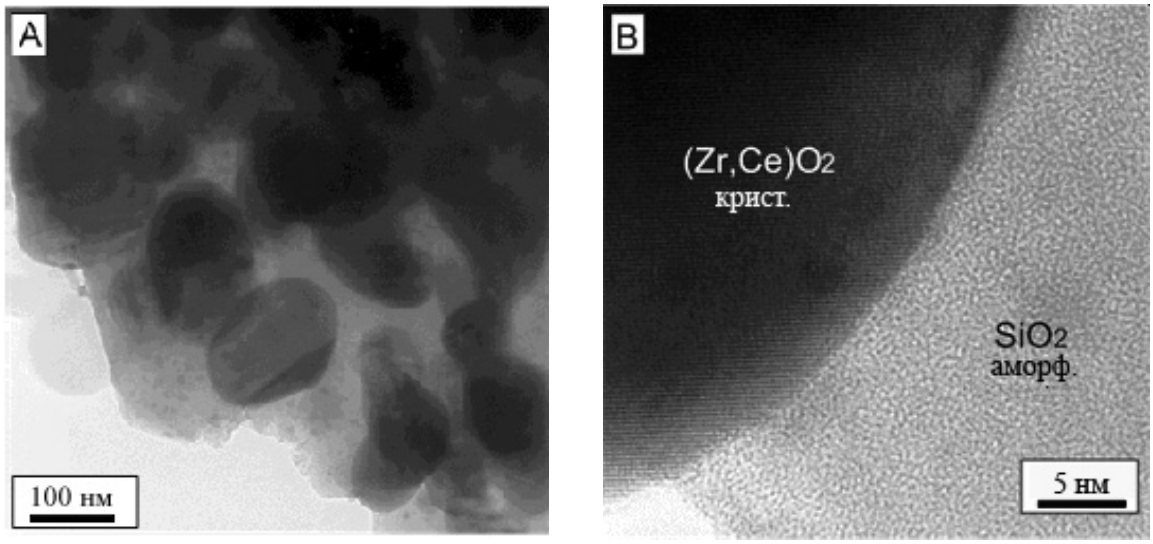


Рис. 12. Электронные изображения кальцинированного плазмой АЦГС, допированного Ce:

A – общий вид, показывающий глобулы диоксида циркония в матрице диоксида кремния; B – изображение высокого разрешения, демонстрирующее кристаллическую структуру глобул диоксида циркония и аморфную структуру матрицы диоксида кремния.

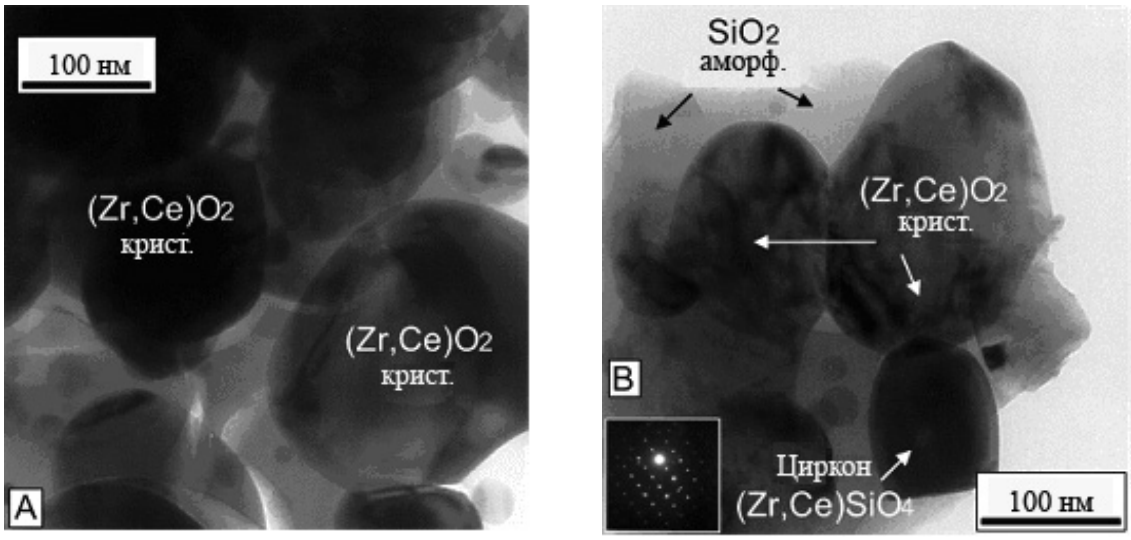


Рис. 13. Электронные изображения кальцинированного плазмой допированного Ce АЦГС, прокаленного на воздухе (T=1400 °C, t=1 ч):

a) глобулы диоксида циркония характеризуются бóльшим размером по сравнению с прокаленным некальцинированным АЦГС (рис. 11); b) образование циркона происходит при меньшей температуре, чем у некальцинированного АЦГС. Вставленные картины электронной дифракции подтверждают идентификацию структуры циркона.

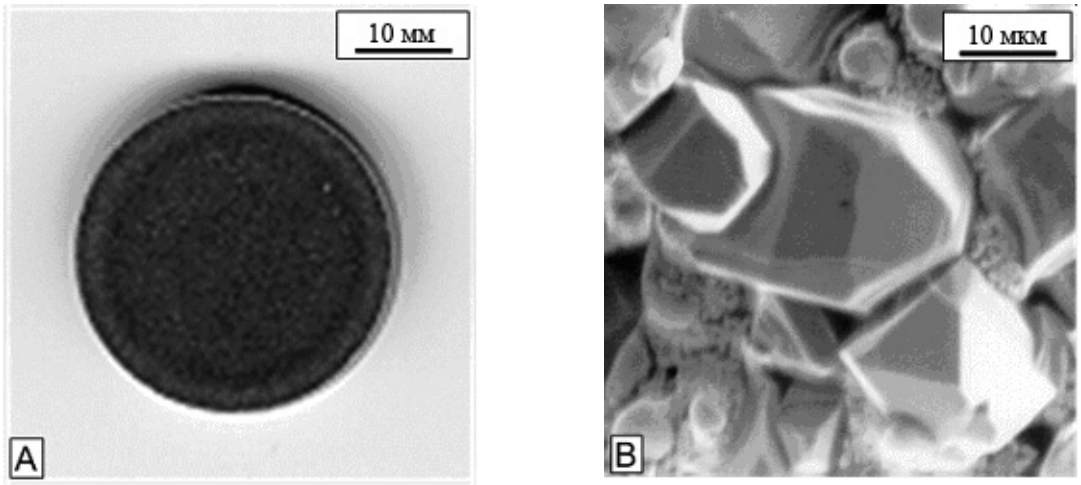


Рис. 14. Керамика на основе циркон/диоксида циркония, допированная 10 вес.% Ce, синтезированная прокаливанием на воздухе (T=1600-1620 °C, t=1 ч) из шихты на основе кальцинированных плазмой Ce-Zr-оксалатов:

A – общий вид керамической таблетки; B – микрокристаллы циркона, выросшие на свежей поверхности керамической таблетки.

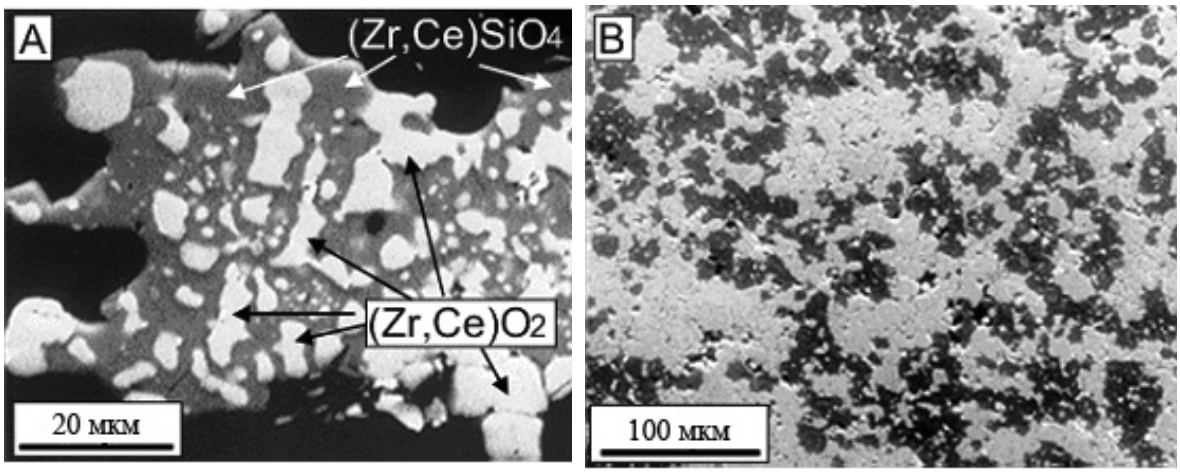


Рис. 15. Изображения в обратнорассеянных электронах кристаллических материалов, полученных прокаливанием на воздухе (T=1600-1620 °C, t=1ч) шихты на основе кальцинированного плазмой Ce-Zr-оксалата:

A – рост допированного Ce циркона как результат взаимодействия между (Zr, Ce)O_2 и силикатным расплавом; B – керамика на основе циркон/диоксида циркония.

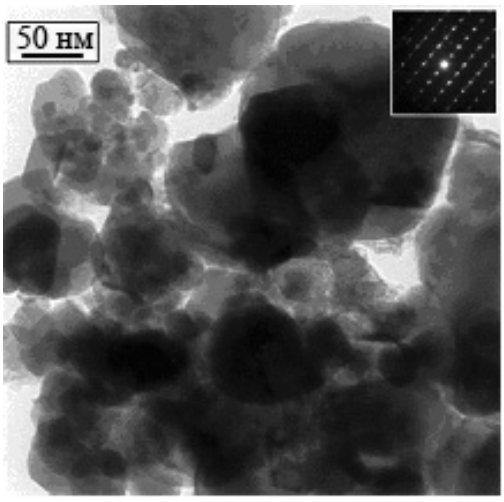


Рис. 16. Электронное изображение частиц диоксида циркония (Zr, Ce)O_2, полученных в результате плазменной кальцинации Ce-Zr соосажденных оксалатов. На вставленной картине электронной дифракции видна тетрагональная структура.

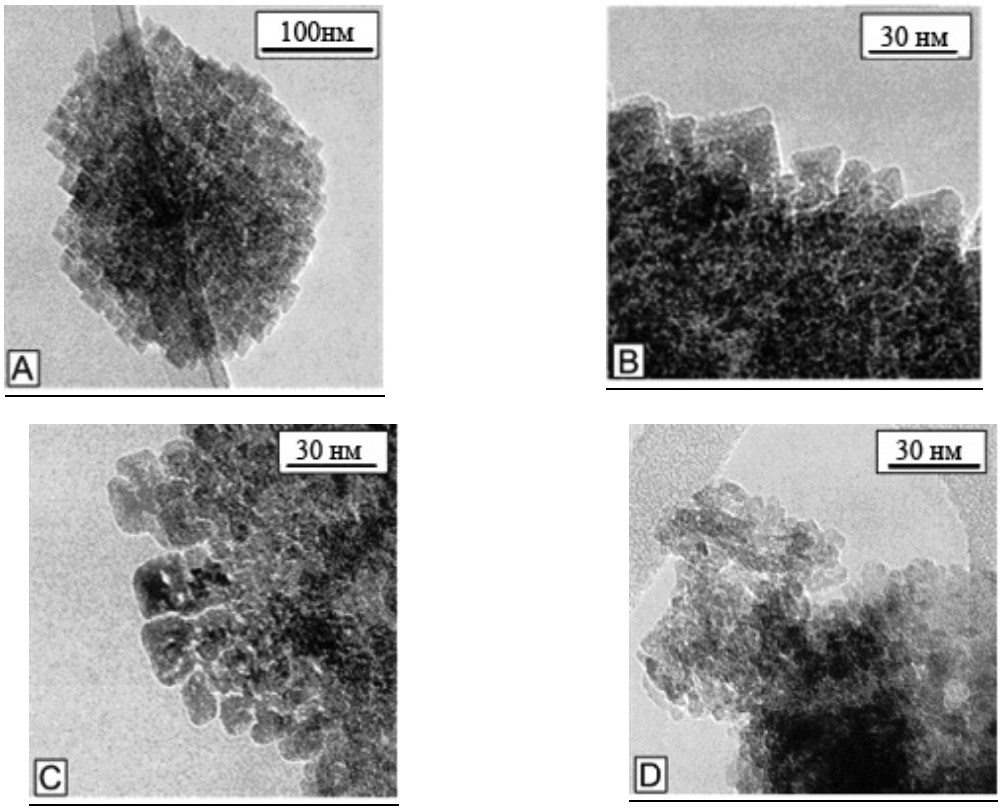


Рис. 17. Электронные изображения допированного U циркона, синтезированного из шихты АЦГС гидротермальным методом (T=350 °C, P=15-20 MPa, t=6 ч):

A – C – хорошо ограненные кристаллы циркона, полученные из раствора со стабилизированным U^{4+}; D – слабокристаллические агрегаты циркона, полученные из раствора при окислительных условиях с U^{6+}.

Основные характеристики керамики, допированной Ce, Gd, U на основе циркон/диоксида циркония, сведены в табл. 1. Характеристики допированной ^{239}Pu керамики представлены в табл. 2. Малый размер зерен отдельных фаз (менее 2 мкм) допированных плутонием образцов ZIR-1, 2, 3 (рис. 18-19) затруднял проведение электронно-зондового микроанализа. Тем не менее в образце ZIR-3 в отдельных агрегатах диоксида циркония было определено содержание плутония (в пересчете на металл) от 12,1 до 15,0 вес.% (рис. 19). Зерна циркона в матрице образца ZIR-4 (рис. 20) имели размеры от 3-5 до 20-30 мкм, что позволило провести корректный микрозондовый анализ (в вес.%): Zr – 45,4; Pu – 6,9; Si – 15,2. Это означает, что температура прокаливания (1500 °C) не оказалась оптимальной для внедрения 10 вес.% плутония в структуру циркона, что привело к образованию включений самостоятельных фаз плутония в форме PuO_2. Результаты теста по выщелачиванию (табл. 3, 4) выявили наибольшие потери плутония для силикат-оксидной циркониевой керамики, подтверждая наличие самостоятельной фазы плутония в матрице керамики. Возможно, фаза диоксида циркония в силикат-оксидной керамике важна не только для включения трехвалентных актиноидов, но и в некоторых случаях для повышения предела вхождения плутония. Очевидно, что емкость структуры циркона по внедрению плутония требует дополнительных исследований.

Таблица 1

Характеристика экспериментов по синтезу керамики с имитаторами Pu

№№ п. п.	Тип керамики	Шихта	Метод синтеза
1.	(Zr, U)SiO_4 + (Zr, U)O_2	$Zr_{метал.}$, U_3O_8, $SiO_{2\ аморф.}$	Холодное прессование, прокаливание на воздухе, T=1500 °C, t=1 ч
		$Zr_{метал.}$, CeO_2, $SiO_{2\ аморф.}$	Горячее прессование на воздухе, T=1300,1400,1500 °C, P=25 Мпа, t=1 ч
2.	(Zr, Ce)SiO_4 + (Zr, Ce)O_2	Золь-гель (Zr, Ce)SiO_x	Прокаливание на воздухе, T=1300,1400,1500,1600,1620 °C, t=1 ч
		Соосажденные оксалаты Zr-Ce после плазменного спекания, $SiO_{2\ аморф.}$	Холодное прессование, покаливание на воздухе, T=1600 °C, t=1 ч
3.	(Zr, Gd)SiO_4 + (Zr, Gd)O_2	Золь-гель (Zr, Gd)SiO_x	Прокаливание на воздухе, T=1300,1400,1500,1600,1620 °C t=1 ч
4.	(Zr, Ce)O_2	Соосажденные оксалаты Zr-Ce	Плазменная кальцинация (+ горячее прессование)
5.	(Zr, Gd)O_2	Соосажденные оксалаты Zr-Gd	Холодное прессование, прокаливание на воздухе, T=1000 °C, t=1 ч

Таблица 2

Характеристика образцов допированной Pu керамики на основе циркон/диоксида циркония (Zr, Pu)SiO_4/(Zr, Pu)O_2, синтезированных прокаливанием на воздухе

№	Условия синтеза		Плотность керамик, г/см^3	Выход диоксида циркония (вес.%) (MZ – моноклинного, TZ – тетрагонального)					Параметры элементарной ячейки циркона, Å
	Время	T, °C		Циркон	PuO_2	SiO_2	MZ	TZ	
ZIR-1	1 ч	1490	3,1–3,2	10–20	–	20	40	20	a = 6,597±0,005 c = 5,972±0,006
ZIR-2	1 ч 30 мин	1500	3,3	75	8-10?	5	менее 1	10	a = 6,609±0,004 c = 5,984±0,004
ZIR-3	3 ч 15 мин	1490	3,7	80	$Pu_{0,5}Zr_{0,5}O_2$? 1-3	–	1-3	15	a = 6,615±0,004 c = 5,990±0,004
ZIR-4	4 ч 3 ч 15 мин	1450 1500	3,4	96-98	2-3	–	менее 0,5	менее 0,5	a = 6,636±0,003 c = 5,994±0,003

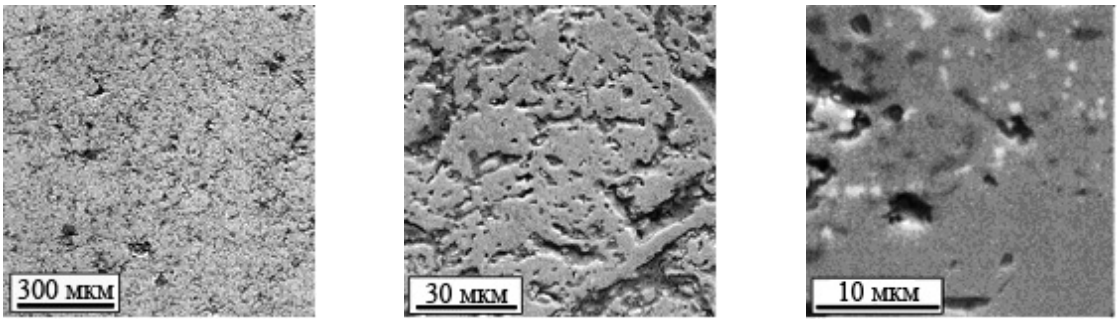


Рис. 18. Электронномикроскопические изображения керамики на основе циркон/диоксида циркония, образец ZIR-2 (холодное прессование АЦГС и прокаливание на воздухе при 1500 °С свыше 1,5 ч). Серая матрица является цирконом, светлые включения – самостоятельные фазы PuO_2.

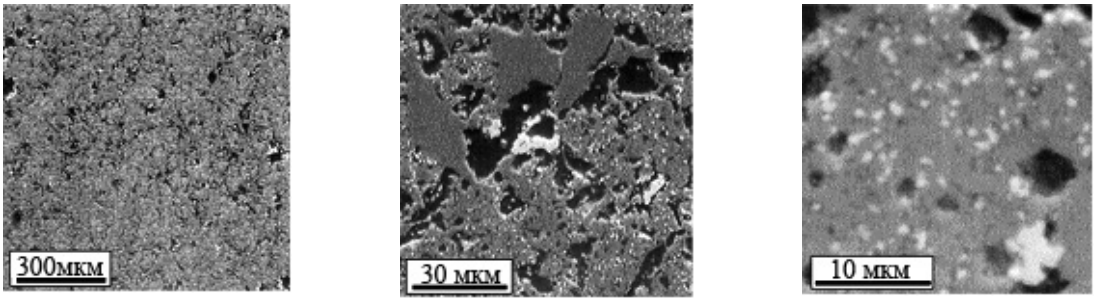


Рис. 19. Электронномикроскопические изображения керамики на основе циркон/диоксида циркония, образец ZIR-3 (холодное прессование АЦГС и прокаливание на воздухе при 1490 °С свыше 3 ч 15 мин). Серая матрица является цирконом, светлые включения – диоксид циркония.

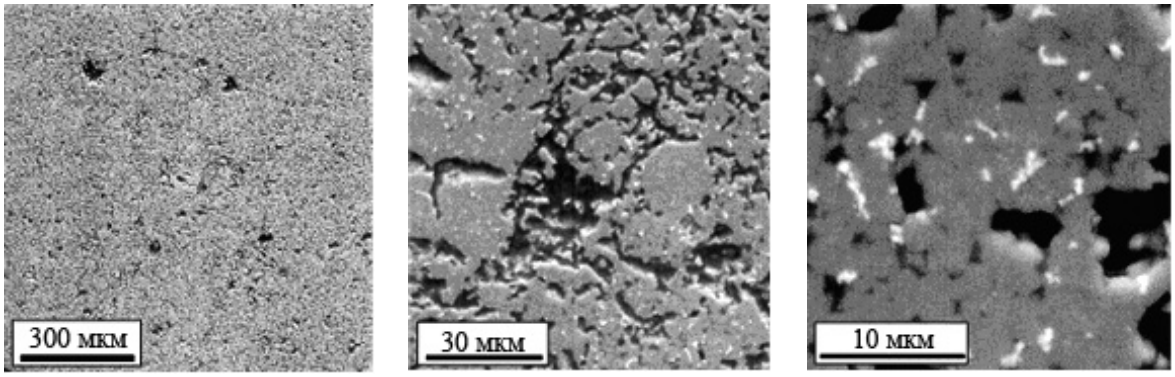


Рис. 20. Электронномикроскопические изображения керамики на основе циркон/диоксида циркония, образец ZIR-4 (холодное прессование АЦГС и прокаливание на воздухе при 1450 °С свыше 4 ч и при 1500 °С свыше 3 ч 15 мин). Серая матрица является цирконом, содержащим приблизительно 7 вес.% Pu, белые включения – самостоятельные фазы PuO_2.

Таблица 3

Результаты теста по выщелачиванию образцов допированной Pu керамики (МСС-1, модифицированный, в деионизированной воде при T=90°C)

Исходный расчетный состав (~10 вес.% загрузки по Pu)	**Шихта и условия синтеза**	**Дни**	**Выщелачивание, г/м^2**	
			^{239}Pu	**^{241}Am**
Образец ZIR-1	золь-гель,	3	$1{,}4\cdot10^{-1}$	$9{,}5\cdot10^{-1}$
$(Zr, Pu)SiO_4$ / $(Zr, Pu)O_2$	неистертый	14	$2{,}0\cdot10^{-1}$	6,9
в вес.%: 80/20	1490 °C/1 ч	28	$2{,}2\cdot10^{-1}$	9,3
Образец ZIR-2	золь-гель,	3	$5{,}3\cdot10^{-2}$	4,7
$(Zr, Pu)SiO_4$ / $(Zr, Pu)O_2$	истертый, прессованный	14	$3{,}4\cdot10^{-2}$	7,4
в вес.%: 80/20	1500 °C/1,5 ч	28	$3{,}5\cdot10^{-1}$	7,6
Образец ZIR-3	золь-гель	3	$2{,}7\cdot10^{-2}$	1,8
$(Zr, Pu)SiO_4$ / $(Zr, Pu)O_2$	истертый, прессованный	14	$2{,}7\cdot10^{-1}$	1,9
в вес.%: 80/20	1490 °C/3 ч 15 мин	28	$3{,}1\cdot10^{-1}$	5,3
Образец Z-1	соосажденные оксалаты	3	$< 1{,}9\cdot10^{-3}$	$1{,}2\cdot10^{-1}$
$(Zr, Pu, Gd)O_2$	Zr-Gd-Pu, истертые, прессованные	14	$< 5{,}0\cdot10^{-3}$	$2{,}6\cdot10^{-1}$
10 мол.% Gd	1300 °C/2 ч	28	$< 6, \cdot10^{-3}$	$3{,}9\cdot10^{-1}$
Образец P-2	«старая» американская шихта + PuO_2, UO_2	3	$< 1{,}9\cdot10^{-3}$	$2{,}1\cdot10^{-3}$
(Ca, Gd, Pu, Hf)-пирохлор	истертая, прессованная	14	$< 5{,}0\cdot10^{-3}$	$4{,}8\cdot10^{-3}$
	1380 °C/4 ч (расплавленная), присутствие CO	28	$< 7{,}5\cdot10^{-3}$	$5{,}9\cdot10^{-3}$
Образец P-1	«старая» американская шихта + PuO_2, UO_2	3	$< 1{,}5\cdot10^{-3}$	$5{,}4\cdot10^{-3}$
(Ca, Gd, Pu, Hf)-пирохлор	истертая, прессованная	14	$< 3{,}8\cdot10^{-3}$	$1{,}4\cdot10^{-2}$
	1280 °C/4 ч, присутствие CO	28	$< 5{,}1\cdot10^{-3}$	$1{,}5\cdot10^{-2}$
Образец ZIR-4	золь-гель	3	$5\cdot10^{-2}$	$4\cdot10^{-1}$
$(Zr, Pu)SiO_4$	истертый, прессованный	14	$2\cdot10^{-1}$	2
	1450 °C/4 ч; 1500 °C/3 ч 15 мин	28	$2\cdot10^{-1}$	2
Образец Z-2	соосажденные оксалаты	3	$5\cdot10^{-3}$	$2\cdot10^{-2}$
$(Zr, Pu, Gd)O_2$	Zr-Gd-Pu, истертые, прессованные	14	$2\cdot10^{-2}$	$5\cdot10^{-1}$
10 мол.% Gd	1450 °C/4ч; 1500 °C/3 ч 15 мин	28	$4\cdot10^{-2}$	1
Образец P-3	«старая» американская шихта + PuO_2, UO_2	3	$4\cdot10^{-4}$	$2\cdot10^{-3}$
(Ca, Gd, Pu, Hf)-пирохлор	истертая, прессованная	14	$9\cdot10^{-4}$	$8\cdot10^{-3}$
	1350 °C/4 ч на воздухе (без CO)	28	$9\cdot10^{-4}$	$1\cdot10^{-2}$
Образец P-4	«новая» американская шихта + PuO_2, UO_2	3	$2\cdot10^{-4}$	$2\cdot10^{-3}$
(Ca, Gd, Pu, Hf)-пирохлор	истертая, прессованная	14	$1\cdot10^{-3}$	$9\cdot10^{-3}$
	1350 °C/4 ч на воздухе (без CO)	28	$1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-2}$

Таблица 4

Результаты теста по выщелачиванию образцов допированной Pu керамики (МСС-1, модифицированный, в деионизированной воде при T=25 °C)

Исходный расчетныйсостав (~10 вес.% загрузки по Pu)	**Шихта и условия синтеза**	**Дни**	**Выщелачивание, г/м^2**	
			^{239}Pu	**^{241}Am**
Образец P-3 (Ca, Gd, Pu, Hf)-пирохлор	«старая» американская шихта + PuO_2, UO_2 истертая, прессованная 1350 °C/4 ч, на воздухе (без CO)	3	$4\cdot10^{-4}$	$8\cdot10^{-4}$
		14	$1\cdot10^{-3}$	$3\cdot10^{-3}$
		28	$1\cdot10^{-3}$	$3\cdot10^{-3}$
Образец P-4 (Ca, Gd, Pu, Hf)-пирохлор	«новая» американская шихта + PuO_2, UO_2 истертая, прессованная 1350 °C/4 ч, на воздухе (без CO)	3	$2\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-2}$
		14	$2\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-2}$
		28	$3\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-2}$
Образец ZIR-4 (Zr, Pu)SiO_4	золь-гель 1450 °C/4 ч; 1500 °C/3 ч 15 мин	3	$8\cdot10^{-3}$	$3\cdot10^{-1}$
		14	$3\cdot10^{-2}$	$9\cdot10^{-1}$
		28	$4\cdot10^{-2}$	$9\cdot10^{-1}$
Образец Z-2 (Zr, Pu, Gd)O_2 20 мол.% Gd	соосажденные оксалаты Zr-Gd-Pu, истертые, прессованные 1450 °C/4 ч; 1500 °C/3 ч 15 мин	3	$4\cdot10^{-3}$	$4\cdot10^{-2}$
		14	$8\cdot10^{-3}$	$2\cdot10^{-1}$
		28	$9\cdot10^{-3}$	$2\cdot10^{-1}$

2. Керамика на основе кубического диоксида циркония

Было обнаружено, что прокаливание даже при низких температурах (1000 °C) соосажденных Ce-Gd-Zr-оксалатов позволяет получить 100% выход кубического диоксида циркония (Zr, Gd, Ce)O_2 (рис. 21), без образования самостоятельных фаз Ce или Gd. Плазмохимическая кальцинация соосажденных оксалатов также позволяет получать твердые растворы с диоксидом циркония для любого имитатора актиноидов (рис. 16). Следовательно, приготовление шихты для синтеза керамики, допированной актиноидом на основе диоксида циркония, может быть обеспечено напрямую из общего раствора, что более привлекательно для применения в промышленных масштабах, чем смешивание порошков оксидов.

В наших экспериментах по синтезу допированных ^{239}Pu образцов мы достигли наивысшей плотности для керамики на основе диоксида циркония (около 5,3-5,6 г/см^3), что меньше, чем для стабилизированного иттрием кубического диоксида

циркония (5,9-6,0 г/см^3). Однако увеличение плотности керамики коррелирует со временем прокаливания. Некоторые опубликованные результаты [24] показывают возможность получения керамики с плотностью свыше 93% от теоретической.

Основные характеристики оксидной циркониевой керамики с плутонием сведены в табл. 5. Было определено, что 20 мол.% Gd являются оптимальными для стабилизации кубической фазы диоксида циркония (структурный тип флюорита). Недостаток Gd (образец Z-1, рис. 22) вызывал появление двух фаз диоксида циркония: тетрагональной и кубической. Однако оба полученных образца характеризовались гомогенной матрицей (рис. 22, 23). Самостоятельных фаз плутония и гадолиния в матрицах образцов обнаружено не было.

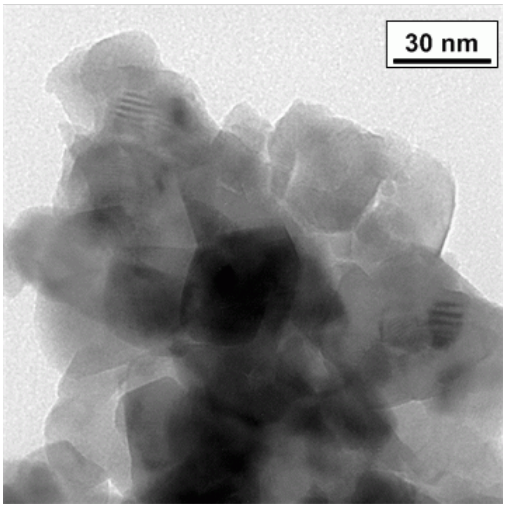


Рис. 21. Электронное изображение микрокристаллов кубического диоксида циркония (Zr, Gd, Ce)O_2, полученного прокаливанием на воздухе (T=1000 °C, t=1 ч) соосажденных Zr-Ce-Gd-оксалатов.

Таблица 5

Характеристика образцов допированной Pu керамики на основе диоксида циркония (Zr, Gd, Pu)O_2, синтезированных прокаливанием на воздухе

№№	**Содержание Gd, мол.%**	**Условия синтеза**		**Плотность керамики, г/см^3**	**Выход диоксида циркония (вес. %): CZ – кубического, MZ – моноклинного, TZ – тетрагонального**			
		Время	**T, °C**		**CZ**	**TZ**	**MZ**	**PuO_2, Gd_2O_3**
Z-1	10	2 ч	1300	4,6	40-45	50	5-10	–
Z-2	20	4 ч 3 ч 15 мин	1450 1500	5,6	100	–	–	–

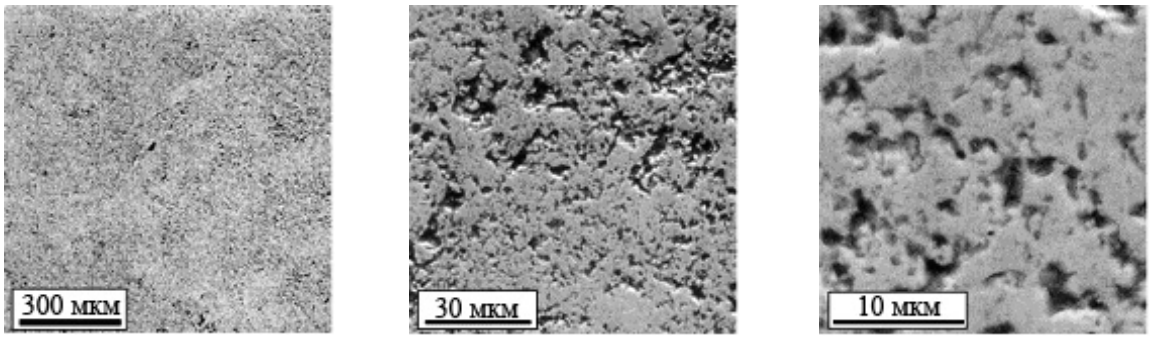


Рис. 22. Электронномикроскопические изображения керамики на основе диоксида циркония, образец Z-1 (соосажденные Zr-Gd-Pu-оксалаты с 10 мол.% Gd, холодное прессование и прокаливание на воздухе при 1300 °C свыше 2 ч).

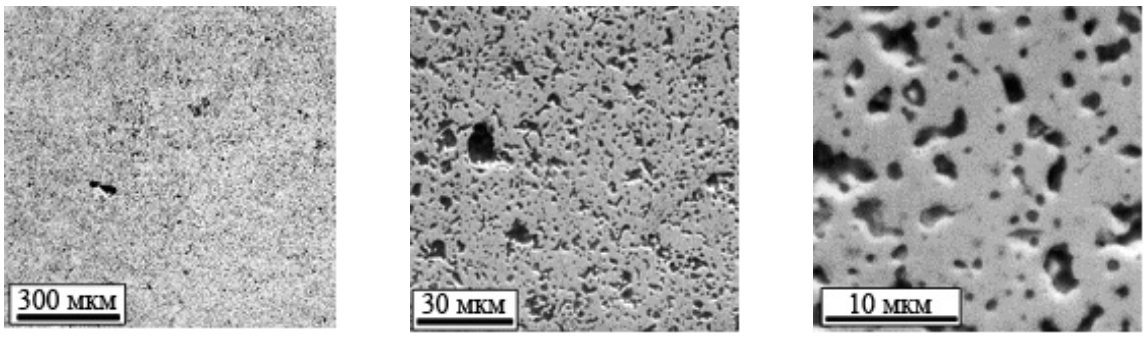


Рис. 23. Электронномикроскопические изображения керамики на основе диоксида циркония, образец Z-2 (соосажденные Zr-Gd-Pu-оксалаты с 20 мол.% Gd, холодное прессование и прокаливание на воздухе при 1450 °C свыше 4 ч, а затем при 1500 °C 3 ч 15 мин).

3. Керамика на основе пирохлора

В экспериментах по синтезу керамики, проведенных в 1987-1988 гг., использование «старой» шихты из Ливерморской лаборатории привело к плавлению конечной керамики, допированной Pu. Плавление началось при температуре 1310 °C, и уже при 1380 °C наблюдалось полное расплавление. В соответствии с данными Ливерморской лаборатории температура плавления «старой» шихты составляла 1404 °C, в то время как «новая» шихта, приготовленная в тех же условиях и из тех же реактивов, не плавилась даже при 1418 °C. Рентгеновский флюоресцентный анализ «старой» и «новой» шихт, полученный в Ливерморской лаборатории, показал небольшое отличие только по содержанию титана.

Нами было решено провести синтез пирохлоровой керамики из «старой» и «новой» шихт в новой печи, изготовленной из пористого корунда. По сравнению с предыдущей эта печь не содержит никакого графита вблизи нагревательных элементов. Присутствие в первой печи нагретого графита ниже тигля (вне высокотемпературной зоны) не создает полностью восстановительные условия при прокалке на воздухе, поскольку система открытая. Однако это может рассматриваться как окислитель-

но-восстановительный буфер (CO), препятствующий полному окислению U^{4+} (из используемого в шихте UO_2) до U^{6+}. Основная характеристика всех образцов пирохлоровой керамики сведена в таблицы 3 и 6. В матрице образца Р-2 (расплавившегося при температуре 1380 °С в присутствии CO) содержались удлиненные кристаллы предположительно фазы браннерита (рис. 24) следующего усредненного состава (по данным микрозондового анализа, вес.%): Hf – 6,6; Ca – 0,6; Gd – 5,9; Pu – 18,4; Ti – 21,4.

Таблица 6

Характеристика образцов американской керамики на основе пирохлора, синтезированной прокаливанием на воздухе (в присутствии и в отсутствие CO)

№№	Условия синтеза		Плотность керамики, г/см^3	Выход в вес.% (Bran. – браннерит, Pyr. – пирохлор)					
	Время	Т, °С, шихта		Bran.	UO_2	PuO_2	Pyr.	$(U_{0,72}Pu_{0,28})O_{2-x}$ ближе к PuO_2	TiO_2
Р-1	4 ч	1280 «старая» шихта в присутствии CO	4,7	1	–	–	95-97	менее 1	1-3
Р-2 расплавл.	4 ч	1380 «старая» шихта в присутствии CO	?	5	5-7	3-5	75	–	менее 1
Р-3	4 ч	1350 «старая» шихта без CO	5,0	3-5	–	+	90-95	3-5 (или PuO_2)	следы
Р-4	4 ч	1350 «новая» шихта без CO	4,9	1-3	–	+	90-95	1-3 (или PuO_2)	1-3

Синтез пирохлоровой керамики при температуре 1280 ºС в присутствии CO позволил получить неплохие образцы (рис. 25). Было показано, что отклонения в химическом составе шихты (например, в экспериментах со «старой» и «новой» шихтой) не приводят к плавлению образцов при 1350 ºС, если синтез проводится на воздухе без CO (рис. 26, 27). Результаты микрозондового анализа пирохлора в образцах керамики приведены в табл. 7.

Таблица 7

Средний химический состав (по данным микрозондового анализа) фазы пирохлора в различных образцах керамики (вес.%/атом.%)

№	Hf	Ca	Gd	Pu	Ti	U	O
Р-1	9,3/2,3	7,7/8,5	7,5/2,1	15,4/2,8	18,6/17,1	18,4/3,4	23,2/63,8
Р-2 распл.,	9,3/2,0	7,7/7,4	5,3/1,3	9,0/1,4	25,8/20,9	16,5/2,7	26,4/64,2
Р-3	7,1/1,7	8,2/8,9	7,4/2,1	10,7/1,9	19,0/17,4	23,1/4,2	23,3/63,7
Р-4	8,1/2,0	8,1/8,7	7,6/2,1	9,0/1,6	19,7/17,7	23,1/4,2	23,6/63,6

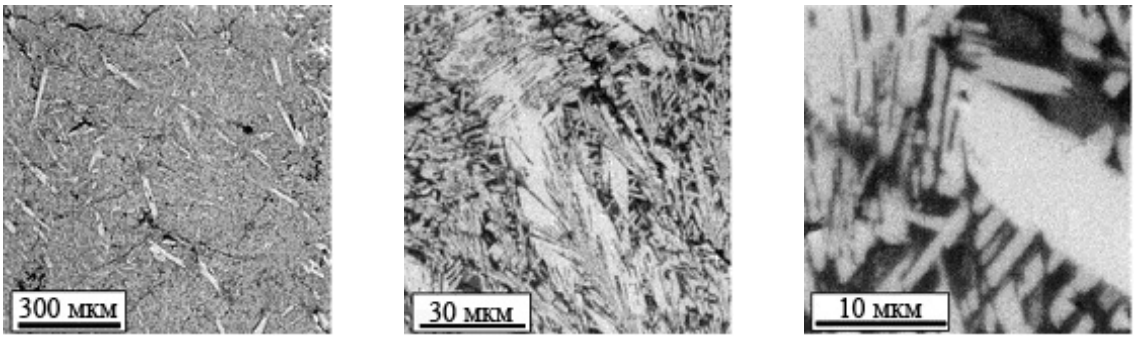


Рис. 24. Электронномикроскопические изображения керамики на основе пирохлора, допированной Pu и U: расплавившийся образец Р-1, полученный из «старой» американской шихты (прокаливание на воздухе, в присутствии CO, при 1380 °C свыше 4 ч). Белые включения являются фазой браннерита.

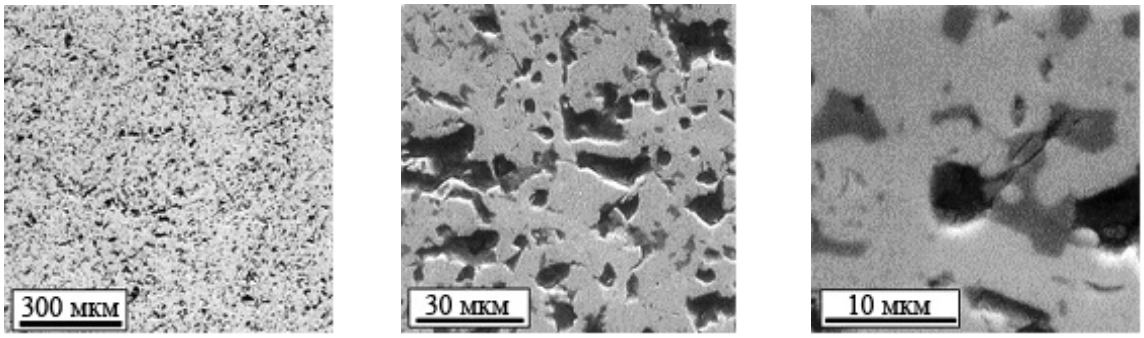


Рис. 25. Электронномикроскопические изображения керамики на основе пирохлора, допированной Pu и U: образец Р-2, полученный из «старой» американской шихты (прокаливание на воздухе, в присутствии CO, при 1280 °C свыше 4 ч). Серая матрица является пирохлором, темная фаза – рутил, TiO_2.

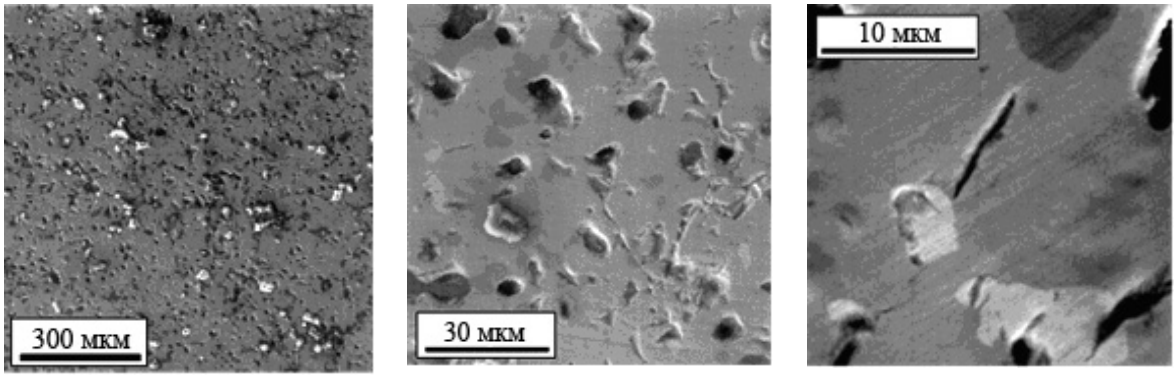


Рис. 26. Электронномикроскопические изображения керамики на основе пирохлора, допированной Pu и U: образец Р-3, полученный из «старой» американской шихты (прокаливание на воздухе, в отсутствие CO, при 1350 °C свыше 4 ч). Серая матрица является пирохлором, светлые включения – самостоятельные фазы PuO_2, темная фаза – рутил, TiO_2.

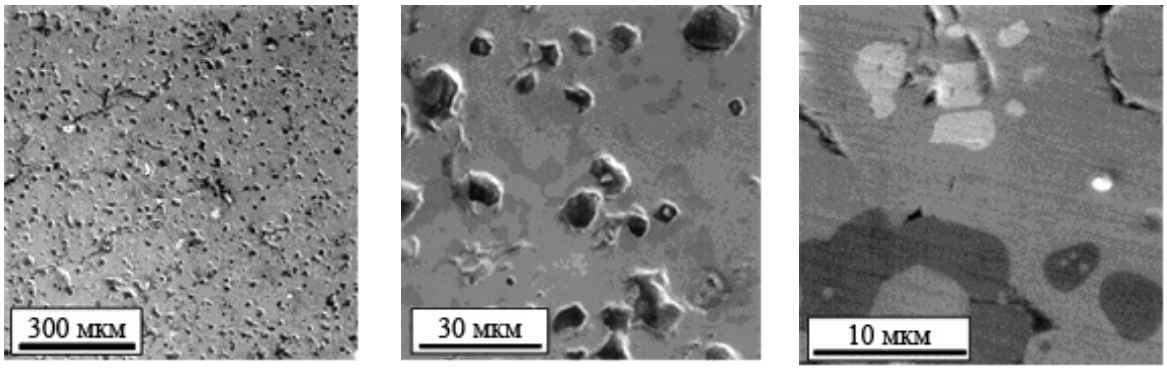


Рис. 27. Электронномикроскопические изображения керамики на основе пирохлора, допированной Pu и U, образец Р-4, полученный из «новой» американской шихты (прокаливание на воздухе, в отсутствие CO, при 1350 °C свыше 4 ч). Серая матрица является пирохлором, светлые включения – самостоятельные фазы PuO_2, темная фаза – рутил, TiO_2.

4. Керамика на основе граната и перовскита

Полученные образцы были изучены под электронным микроскопом с микроанализатором (табл. 8, рис. 28-29). Изученные гранат и перовскит описываются следующими формулами:

- гранат (образец № 1): $(Ca_2Gd)(Gd_{0,20}Ce_{0,24}Sn_{0,006}Pu_{0,04}Ga_{1,60}Al_{2,90})O_{11,7}$;
- перовскит (образец № 1): $(Ca_{0,11}Gd_{1,70}Ce_{0,13}Pu_{0,04})(Ga_{0,04}Al_{0,96})O_3$;
- гранат (образец № 2): $Na_2(Gd_{1,40}Ce_{0,08}Zr_{0,08}Sn_{0,002}Pu_{0,03})(Ga_{2,3}Al_{2,6})O_{11,4}$.

Было показано, что гранат может включать в себя значительные количества Na и Ca. Однако окончательный вариант получения гранат-перовскитовой керамики может быть оптимизирован путем снижения температуры плавления. Это позволит избежать образования самостоятельных фаз актиноидов и достичь большего соответствия реальным составам отходов ПО «Маяк».

Таблица 8

Результаты микрозондового анализа граната и перовскита

Элемент	Среднее содержание в отдельных фазах, масс. %		
	Na-образец	Ca-образец	
	гранат	гранат	перовскит
Ca	–	11,9	2,1
Gd	31,4	26,8	50,1
Ce	1,5	4,8	8,6
Pu	0,7	1,2	4,1
Sn	0,1	0,1	–
Ga	22,5	15,9	1,3
Zr	1,1	–	–
Na	6,6	–	–
Al	9,9	11,3	11,2

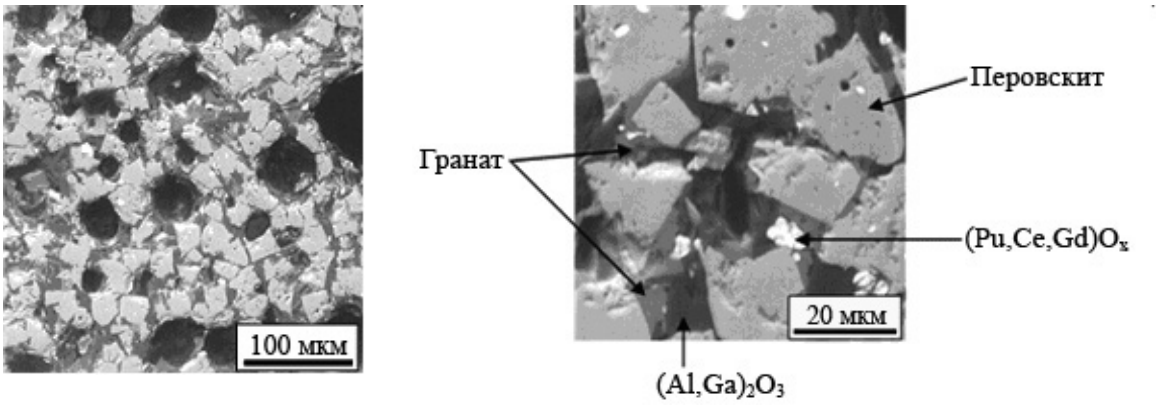


Рис. 28. Гранат-перовскитовая керамика (Ca-состава), полученная плавлением на воздухе при 1500-1550 °C (изображение в обратно-рассеянных электронах).

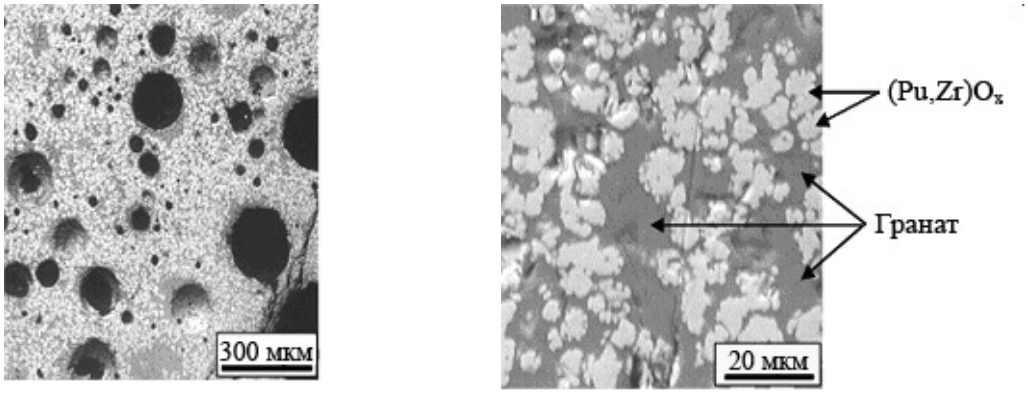


Рис. 29. Гранатовая керамика (Na-состава), полученная плавлением на воздухе при 1500-1600 °C (изображение в обратно-рассеянных электронах).

5. Методы анализа

1. Рентгеновский дифракционный анализ (РДА)

Все образцы в виде порошка помещались в специальную герметичную алюминиевую кассету (разработанную в Радиевом институте им. В. Г. Хлопина), снабженную бериллиевым окном 25-30 мм в диаметре и толщиной от 50 до 150 мкм. В качестве внутреннего стандарта использовался порошок кварца SiO_2. РДА проводили на оборудовании «Гейгерфлекс» D/maxRC (Ригаку, Япония) с использованием KaCo и KaCu монохроматического излучения, со скоростью 2-4°/мин и шагом регистрации 0,01°. Качественный и полуколичественный анализ фазового состава осуществляли при помощи исходной базы данных фирмы Ригаку.

В РИ была разработана специальная кассета (рис. 30), позволяющая проводить безопасный рентгенодифракционный анализ образцов, допированных $^{238\text{-}239}$Pu, герметично упакованных для предотвращения загрязнения оборудования. В то же время данная кассета обеспечивает надежную сохранность даже поврежденных образцов в течение длительного времени для периодического

рентгенодифракционного анализа. В РИ приготовлены перчаточные боксы и другое оборудование для работы с образцами, допированными ^{238}Pu. Были установлены новые аэрозольные плутониевые фильтры, а также произведены или приобретены необходимые материалы.

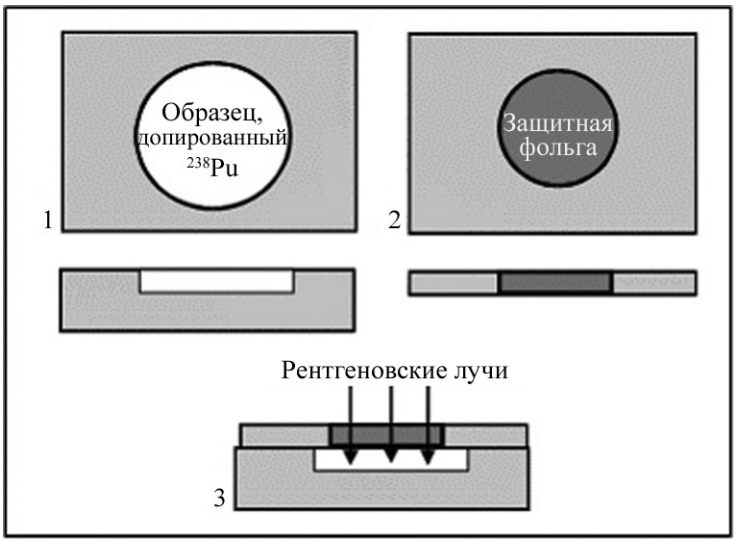


Рис. 30. Специальная кассета, разработанная в Радиевом институте для рентгенодифракционного анализа допированных плутонием образцов и для хранения образцов, содержащих ^{238}Pu и ^{239}Pu, в течение длительного времени:

1 – стандартный держатель образца, изготовленный из алюминия или меди; 2 – защитная пластина с бериллиевым окном, прозрачным для рентгеновских лучей; 3 – смонтированная кассета в разрезе.

2. Микрозондовый и СЭМ анализы

Полированные образцы с медным или серебрянным напылением были изучены на стандартном оборудовании «Камебакс» (Камека, Франция) для получения изображения в обратнорассеянных электронах. Количественный микрозондовый анализ проводился с использованием кристаллических стандартов: SiO_2 кварц, TiO_2 рутил, $ZrSiO_4$, PuO_2, HfO_2, Gd_2O_3, $CaAl_2Si_2O_8$ и компьютерного кода ZAF.

3. Тест на выщелачивание

Тест на выщелачивание для допированных Ce образцов керамики был проведен в соответствии с MCC-1 модифицированной процедурой со следующими характеристиками:

- для выщелачивания использовали только отдельные монолитные образцы правильной формы: площадь поверхности, подвергнутая воздействию выщелачивающего раствора (реагента), должна быть легко определяема;
- все образцы исследовали методами оптической микроскопии, рентгеновской дифракции электронной микроскопии;

- образцы очищали деионизированной водой и этанолом;
- контейнеры для тестов на выщелачивание были изготовлены из тефлоновых стержней и имели навинчивающуюся крышку и объем около 20 мл. Свежеизготовленные контейнеры заполняли раствором NaOH и выдерживали при 70-90 °С в течение одной недели для снижения выхода фтора в реакционный раствор;
- тестируемый образец устанавливали на дно тефлонового контейнера. Объем реагента определяли из соотношения поверхность/объем = 1/10;
- контейнер с образцом опускали в контейнер из нержавеющей стали и устанавливали в печь при температуре 90 °С;
- раствор реагента заменяли после 3, 14 и 28 дней с начала теста. В результирующий выщелант добавляли концентрированную азотную кислоту, и его направляли на анализ;
- нормализованную элементную потерю массы рассчитывали с использованием следующего соотношения:

$$(NL)_i = m_i/(f_i \cdot SA),$$

где m_i – масса элемента i в выщеланте (г); f_i – масса элемента i в исходном образце (вес.%); SA – площадь поверхности образца ($м^2$).

- измерения сорбции должны проводить по окончании последнего периода теста от 14 до 28 дня. Контейнер наполняется раствором 6 М азотной кислоты и перекиси водорода и выдерживается 12 ч при 70-90 °С. Полученный раствор анализируется и производится поправка результатов 3-го и 14-го дней.

Для трех типов образцов керамики, допированных 10 вес.% Ce, были получены следующие результаты теста на выщелачивание (при T=90 °C в деионизированной воде, после 3/14/28 дней):

- циркон (80%)/диоксид циркония, полученный горячим неосевым прессованием при T=1400 °C и P=25 MPa, t=1 ч, (NL)Ce= $(1,1/0,7/0,4)\cdot 10^{-3}$ г/$м^2$;
- циркон (80%)/диоксид циркония, полученный прокаливанием на воздухе при T=1000 °C, t=1 ч, (NL)Ce= $(1,9/3,4/2,5)\cdot 10^{-3}$ г/$м^2$;
- диоксид циркония (кубический, стабилизированный 20 мол.% Gd), полученный прокаливанием на воздухе при T=1000 °C, t=1 ч, (NL)C $=(1,1/0,7/0,4)\times$ $\times 10^{-3}$г/$м^2$.

Выщелачивающий раствор заменялся свежей водой через 3 и через 14 дней после начала эксперимента. Образцы очищались промыванием в чистой воде и этаноле. Анализ ^{239}Pu и ^{241}Am (как продукта распада ^{241}Pu, присутствующего в плутониевой керамике) в растворе производился через 3, 14 и 28 дней. Определение Pu и Am, сорбированных на стенках стаканов, производилось через 28 дней. Нормализованная потеря массы Pu (NL) вычислялась следующим образом:

$$NL = A \times W_0 / A_0 \times S,$$

где A – суммарная активность Pu в водном растворе после выщелачивания, Бк; A_0 – начальная активность Pu в образце, Бк; W_0 – начальная масса образца, г; S – площадь поверхности образца без учета поправки на пористость керамики, $м^2$.

Для определения выноса Pu из образцов керамики была использована альфа-спектрометрия. Источники приготовлялись испарением 0,5 $см^3$ раствора с поверхности полированных мишеней из нержавеющей стали. Активность плутония (A (Pu)) вычислялась как функция активности америция (A (Am)), определенной прецизионной гамма-спектрометрией:

$$A\ (Pu) = A\ (Am) \times K,$$

где $K = N\ (Pu)/N\ (Am)$; $N\ (Pu)$ – площадь альфа-пика Pu; $N\ (Am)$ – площадь альфа-пика Am.

Ожидаемая погрешность расчета K оценивается в 15%.

Количественный гамма-спектрометрический анализ ^{241}Am проводился по самому интенсивному пику 58,5 КэВ. Относительная погрешность измерений оценивается в 6-7%. Предел обнаружения ^{239}Pu – от 5 до 30 Бк, в зависимости от активности ^{241}Am. Полученные результаты по выщелачиванию Pu-содержащих керамик приведены в табл. 4 и 9.

4. Изучение поведения Pu керамики в условиях подземного захоронения

Для приготовления иононасыщенных водных растворов были использованы предварительно изученные образцы гранита, отобранные на Нижнеканском массиве с глубин 500-503 м. Эти граниты характеризуются следующим минеральным составом (по данным рентгенофазового анализа, в масс. %):

- кварц, SiO_2 – 35-40;
- полевой шпат, $(K, Na)AlSi_3O_8$ – 45;
- плагиоклаз, $(Ca, Na)Al_2Si_2O_8$ – 15-20;
- биотит, $K\ (Mg, Fe)_3[Si_3AlO_{10}][OH, F]_2$ – 2;
- мусковит, $KAl_2[AlSi_3O_{10}][OH]_2$ – 1-2;
- магнетит, Fe_3O_4 – 0,1-0,3.

Общий (валовый) химический состав (масс. %): SiO_2 – 76,9; Al_2O_3 – 12,9; K_2O – 5,5; Na_2O – 3,1; CaO – 0,6; Fe_2O_3 – 0,3; FeO – 0,3; MgO – 0,1.

Образцы пород были измельчены, отмыты и разделены по крупности. Для проведения экспериментов были отобраны фракции 0,10-0,25 мм:

- американский пирохлор $Ca(Hf, Pu, U, Gd)Ti_2O_7$, содержащий 9,8-9,9 масс.% Pu и 0,1-0,2 масс.% Am, – получен спеканием на воздухе в присутствии CO при температуре 1280 °C в течение 4 ч;
- циркон $(Zr, Pu)SiO_4$, содержащий 5-6 масс.% Pu и 0,04-0,05 масс. % Am, – получен спеканием на воздухе: 4 ч при 1450 °C, затем 3 ч при 1500 °C;
- монофазная керамика, состоящая из диоксида циркония $(Zr, Gd, Pu)\ O_2$, содержащая 9,8-9,9 масс.% Pu и 0,1-0,2 масс.% Am, – получена спеканием на воздухе при температуре 1600 °C в течение 4 ч.

Таблица 9

Сводные данные по результатам синтеза турмалина

№	Реактивы, шихта	Растворы	Условия опыта		Продукты синтеза	Примечание	Ссылки
			T, °C	P, бар			
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Плавленое турмалиновое стекло	Водные растворы боратов Mg и щелочных Me	400-500		Кристаллы турмалина 0,0005 мм		Frondel C. et al., 1947 [30]
2	$SiO_2 + Al_2O_3 + MgO$	H_3BO_3 + LiF + железисто-аммонийный сульфат	400	Около 1000	Кристаллы турмалина 0,05 мм		Smith F. G., 1949 [31]
3	SiO_2, Al_2O_3, K_2SiF_6, металл. Fe, $MgSO_4$	H_3BO_3	500	500	Сферолитовые кристаллы турмалина 0,01-0,03 мм		Michel-Levy M., 1953 [32]
4	Пирофиллит ($Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$)	H_3BO_3+ NaCl	350-550	700-2000	Кристаллы турмалина 0,5 мм		Frondel C., Collette R. L., 1957 [33]
5	SiO_2 +Al $(OH)_3$ + B_2O_3 + Me или оксиды, гидроксиды, карбонаты Me, входящих в турмалин (Fe, Co, Ni, Cr, Mg, V)	NaF или Na_2CO_3	400-600		Сферолитовые кристаллы турмалина 0,02-0,09 мм		Taylor A. M., Terrel B. C., 1967 [34]
6	Алюмосиликаты: (топаз ($Al_2SiO_4(F, OH)_2$), пирофиллит ($Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$), каолинит $Al_2Si_2O_5(OH)_4$) с оксидами Me, входящих в турмалин	H_3BO_3 (до 14%)+ NaCl - (до 3%) or NaF (до 3%)	350-600	400-3000	Кристаллы турмалина 0,6×0,1мм с фаялитом (Fe_2SiO_4), хиолитом ($Na_5Al_3F_{14}$), нефелином ($NaAlSiO_4$); рост на эльбаитовой подложке (0,1 мм/день)		Емельянова Е. Н., Зигарева Т. А., 1960 [35]
	Топаз	H_3BO_3 + LiF			Рост бесцветного турмалина на подложке + криолитионит $Na_3Li_3Al_2F_{12}$		

Таблица 9 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8
7	Силлиманит (Al_2SiO_5)	H_3BO_3 + NaF + LiF +CaF_2; H_3BO_3 + NaF + NaCl + LiF +CaF_2	550-600	2000	Небольшие кристаллы турмалина + кварц (SiO_2) + борацит ($Mg_3B_7O_{13}Cl$)		Воскресенская И. Е., 1965 [36]
	Топаз ($Al_2SiO_4(F, OH)_4$)+ дистен (Al_2SiO_5)	«	«	«	Рост черного турмалина на подложке (0,25 мм/день) + хиолит		
	Топаз	H_3BO_3 +NaF + LiF + CaF_2 + $Mg_3(BO_3)_3$	< 550	2000	Рост бесцветного турмалина на подложке (1,5 мм/день) + хиолит + криолитионит	Pt капсула	
8	Дистен	H_3BO_3 + NaCl	500-600	2000	Кристаллы турмалина 0,1-0,2 мм + фаялит	B –Cl система	Воскресенская И. Е., Барсукова М. Л., 1968 [37]
	Силлиманит	«	«	«	«		
	Андалузит (Al_2SiO_5)	«	«	«	«		
	Пирофиллит	«	400-600	1500-2000	«		
	Топаз	H_3BO_3 (2-30%) + NaF	500-600	2000	Кристаллы турмалина 0,2-0,3 мм + хиолит	B –F система	
	Ортоклаз $KalSi_3O_8$	«	600	2000	Кристаллы турмалина + криолит		
	Дьюмортьерит $Al_7(BO_3)(SiO_4)_3O_3$	«	600	2000	Кристаллы турмалина		
	Топаз	H_3BO_3 (2-30%) + NaCl (2,5%)	400-700	2000-3000	Кристаллы турмалина 0,01-0,2 мм + хиолит	B –F –Cl система	
	Топаз	H_3BO_3 + NaCl (с добавкой $CaCl_2$)	600	2000	Турмалин не был получен		
	Топаз	H_3BO_3 + NaF + NaCl	700	3000	Рост бесцветного турмалина (0,1 мм/день) на подложке	Al-турм. (оленит)	

Таблица 9 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8
8	Топаз	H_3BO_3 + NaCl + LiF + CaF_2	400-750	1000-3000	Кристаллы турмалина шерл-эльбаит 0,5–1,5 мм	Pt капсула	
	SiO_2 + Al_2O_3 + GaO	H_3BO_3 + NaCl	700	2000	Кристаллы Ga-турмалина		
	Плавленое турмалиновое стекло	H_3BO_3 + NaF	700	3000	Турмалин состава, соответствующего стеклу, + муллит ($Al_6Si_2O_{13}$)	Муллит присутствует в турмалиновом стекле	
9	SiO_2 + Al_2O_3 + оксиды Me, входящих в турмалин (Al, Mg, Fe)	H_3BO_3 +NaCl	750-800	5000-8000	Сферолитовые кристаллы турмалина (Al-, Mg- и Fe-турмалина) 0,5-1,5 мм	Cu и Pt капсулы 0,5-0,8 мл	Воскресенская И. Е., Штернберг А. А., 1973 [38]
	SiO_2 + Al_2O_3 стержни	H_3BO_3 +NaCl +кристаллогидраты $MgCl_2 \cdot 6H_2O$	«	«	Рост бесцветного турмалина на подложке дравита (1 мм/день) и кристаллы турмалина 1,5-2 мм + следы муллита	Капсула 3-4 мм	
	«	H_3BO_3 + NaCl + $FeCl_2 \cdot 4H_2O$	«	«	Рост коричневого турмалина на подложке шерла + следы муллита		
	«	H_3BO_3 +NaCl + LiCl	«	«	Турмалин не был получен, субстрат разложился, образовался эукрипит ($LiAlSiO_4$)		
	«	H_3BO_3 + NaCl + $MgCl_2 \cdot H_2O$	800	1000	Рост окрашенного турмалина на подложке без мелких паразитических кристаллов		
10	«	H_3BO_3 + NaCl + $MgCl_2 \cdot H_2O$	750	1000-2000	Рост бесцветного турмалина на подложке дравита и небольшие кристаллы 2 мм	Подложка эльбаита разложилась	Воскресенская И. Е., Иванова Т. Н., 1975 [39]

Таблица 9 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8
10	$SiO_2 + Al_2O_3$ стержни	$H_3BO_3 + NaCl + FeCl_2 \cdot H_2O$	750-800	1000-2000	Рост светло-коричневого турмалина на подложке шерла + кристаллы 1мм		Воскресенская И. Е., Иванова Т. Н., 1975 [39]
	«	$H_3BO_3 + NaCl + CoCl_2 \cdot H_2O$	750-800	1000-2000	Рост малинового турмалина на подложке (0,2-0,3 мм/день) и кристаллы 2 мм		
	«	$H_3BO_3 + NaCl + NiCl_2 \cdot H_2O$	750-800	1000-2000	Рост светло-зеленого турмалина на подложке и кристаллы менее 1мм		
	«	$H_3BO_3 + NaCl + CrCl_3 \cdot H_2O$	750-800	1000-2000	Рост темно-зеленого турмалина на эльбаитовой подложке (0,1 мм/день). Без мелких паразитических кристаллов		
	«	$H_3BO_3 + NaCl + MnCl_2 \cdot H_2O$	750-800	1000-2000	Турмалин не был получен, образовался борацит $Mn_3B_7O_{13}Cl$		
	« + MgO	$H_3BO_3 + NaCl + MnCl_2 \cdot H_2O$	750-800	1000-2000	Рост бесцветного турмалина на подложке (0,2 мм/день) и мелкие сферолитовые кристаллы		

Были проведены следующие эксперименты:

1. Порошки Pu-содержащей пирохлоровой керамики и керамики на основе диоксида циркония (по 200 мг каждого типа) были помещены (раздельно) в тефлоновые стаканы с водой (10 мл) и выдержаны в сушильном шкафу в течение 3 месяцев при температуре 90 °С;
2. Порошки трех типов Pu-содержащей керамики, состоящей из 1) циркона, 2) диоксида циркония и 3) пирохлора (по 200 мг каждого типа), были помещены в тефлоновые стаканы с водой (10 мл) и выдержаны в сушильном шкафу при температуре 90 °С в течение 7 месяцев;
3. Порошки трех типов Pu-содержащей керамики, состоящей из 1) циркона, 2) диоксида циркония и 3) пирохлора (по 200 мг каждого типа), были помещены в тефлоновые стаканы с водой и порошком гранита (примерно 1 г порошка на 12 мл воды) и выдержаны в сушильном шкафу при температуре 90 °С в течение 3 месяцев.

Для проведения экспериментов по изменению керамики в ионно-насыщеных растворах, имитирующих подземные воды, были разработаны специальные стаканы (рис. 31).

Главной целью экспериментов № 1 и 2 являлось изучение устойчивости кристаллической структуры фаз-носителей Pu к гидратации, стабильности твердых растворов Pu в чистой воде при 90 °С. Особенно интересно было идентифицировать самостоятельные фазы Pu, образованные в результате распада твердых растворов. Полученные результаты суммированы в табл. 10.

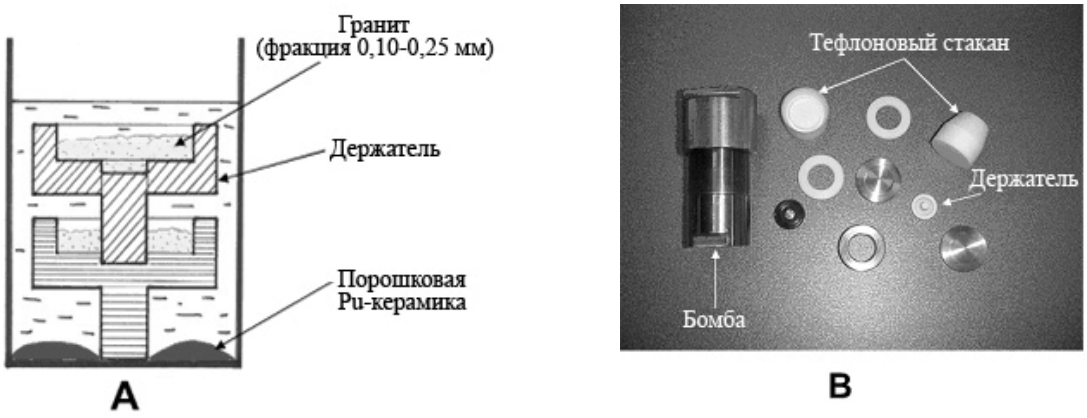


Рис. 31. Специальные стаканы, разработанные для проведения экспериментов по изменению керамики при температуре 90 °С (и выше):

А – схема (в разрезе) тефлонового стакана с емкостями для порошка горных пород и Pu-керамики, помещенными в воду; В – все детали стакана и бомбы до эксперимента.

Эксперимент № 3 проводился главным образом для оценки вклада ионо-насыщенных растворов в вынос Pu из керамических матриц и сорбции Pu на гранитах.

Полученные результаты показали, что в порошках керамики на основе диоксида циркония и пирохлора после воздействия воды (*эксперимент № 1*, 3 месяца при 90 °С) и последующей кальцинации на воздухе при 400 °С, самостоятельные фазы Pu обнаружены не были. Даже если изменение имело место в процессе эксперимента, кальцинация полностью стерла различия между исходными и измененными образцами без выделения самостоятельных фаз Pu.

Таблица 10

Нормализованная потеря массы Pu и Am (г/м^2) в керамических матрицах по методике МСС-1, в воде при 25 и 90 ºС.
(Поправка на пористость керамики не определена)

Образец	Pu			Am		
	3 дня	14 дней	28 дней	3 дня	14 дней	28 дней
при 25 ºС						
Циркон	$6{,}6\cdot10^{-4}$	$1{,}0\cdot10^{-3}$	$1{,}2\cdot10^{-3}$	$5{,}0\cdot10^{-3}$	$2{,}1\cdot10^{-2}$	$2{,}2\cdot10^{-2}$
Диоксид Zr	$8{,}9\cdot10^{-4}$	$5{,}6\cdot10^{-3}$	$5{,}3\cdot10^{-3}$	$2{,}3\cdot10^{-2}$	$6{,}7\cdot10^{-2}$	$7{,}0\cdot10^{-2}$
Пирохлор	$2{,}8\cdot10^{-3}$	$2{,}1\cdot10^{-3}$	$2{,}3\cdot10^{-3}$	$5{,}9\cdot10^{-3}$	$1{,}0\cdot10^{-2}$	$1{,}5\cdot10^{-2}$
при 90 ºС						
Циркон	$1{,}7\cdot10^{-3}$	$7{,}0\cdot10^{-3}$	$8{,}2\cdot10^{-3}$	$4{,}6\cdot10^{-2}$	$1{,}8\cdot10^{-1}$	$1{,}8\cdot10^{-1}$
Диоксид Zr	$7{,}0\cdot10^{-3}$	$1{,}1\cdot10^{-3}$	$1{,}0\cdot10^{-3}$	$9{,}3\cdot10^{-2}$	$2{,}0\cdot10^{-1}$	$3{,}3\cdot10^{-1}$
Пирохлор	$4{,}0\cdot10^{-3}$	$8{,}2\cdot10^{-3}$	$9{,}1\cdot10^{-3}$	$4{,}9\cdot10^{-3}$	$1{,}7\cdot10^{-2}$	$3{,}5\cdot10^{-2}$

Эксперимент № 2 имел бóльшую продолжительность (7 месяцев в деионизированной воде при 90 °С). Он вызвал незначительные изменения в фазовом составе керамики, состоящей из диоксида циркония (рис. 33, табл. 12) и циркона (рис. 34, табл. 13). Однако существенный эффект проявился в пирохлоровой керамике (рис. 32, табл. 11). Содержание браннеритовой фазы уменьшилось после эксперимента по меньшей мере в два раза (от 10 до 3-5 масс.%). В то же время содержание рутила возросло (от 1-3 до 3-5 масс.%). В измененном образце также отмечаются следовые количества U_3O_8. Содержание пирохлора в исходном и измененном образце не отличается.

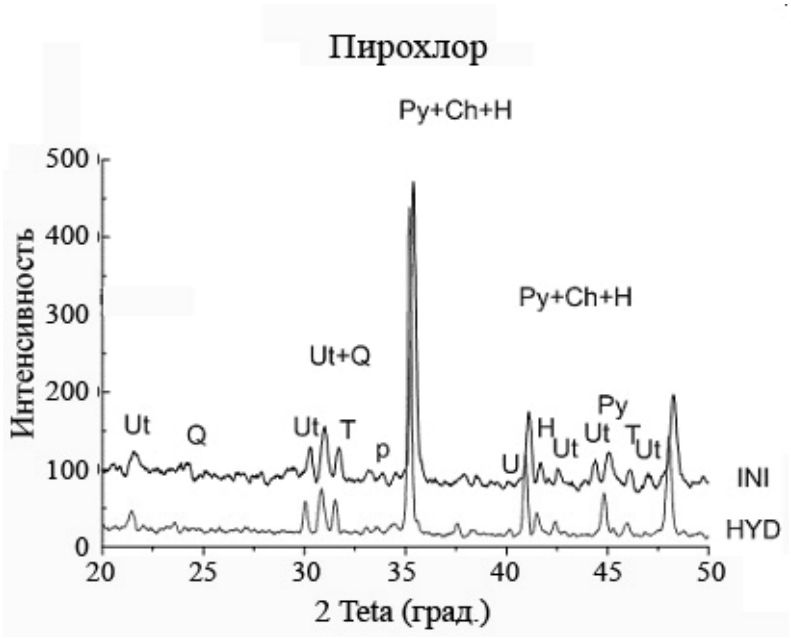


Рис. 32. Рентгеновский спектр Pu-содержащей пирохлоровой керамики:
INI – исходное состояние; HYD – образец после эксперимента № 2.

Таблица 11

Фазовый состав Pu-содержащей пирохлоровой керамики (эксперимент № 2)

Фаза	**Содержание в образце (масс.%)**	
	Исходный (INI)	**Измененный (HYD)**
$Gd_2Ti_2O_7$/Py $CaHfO_3$? /Ch HfO_2куб./H	55 30 3-5	60 30 1-5
UTi_2O_6/Ut	10	3-5
TiO_2/T	1-3	3-5
U_3O_8/U	–	менее 1
(U, Pu) O_2/p	≈1	–

Примечание: Дифракционные максимумы $Gd_2Ti_2O_7$; $CaHfO_3$ и HfO_2 частично перекрываются. $CaHfO_3$ упоминается только в качестве фазы, возможной вследствие компьютерной интерпретации дифракционных спектров. Ее содержание может считаться частью содержания пирохлора.

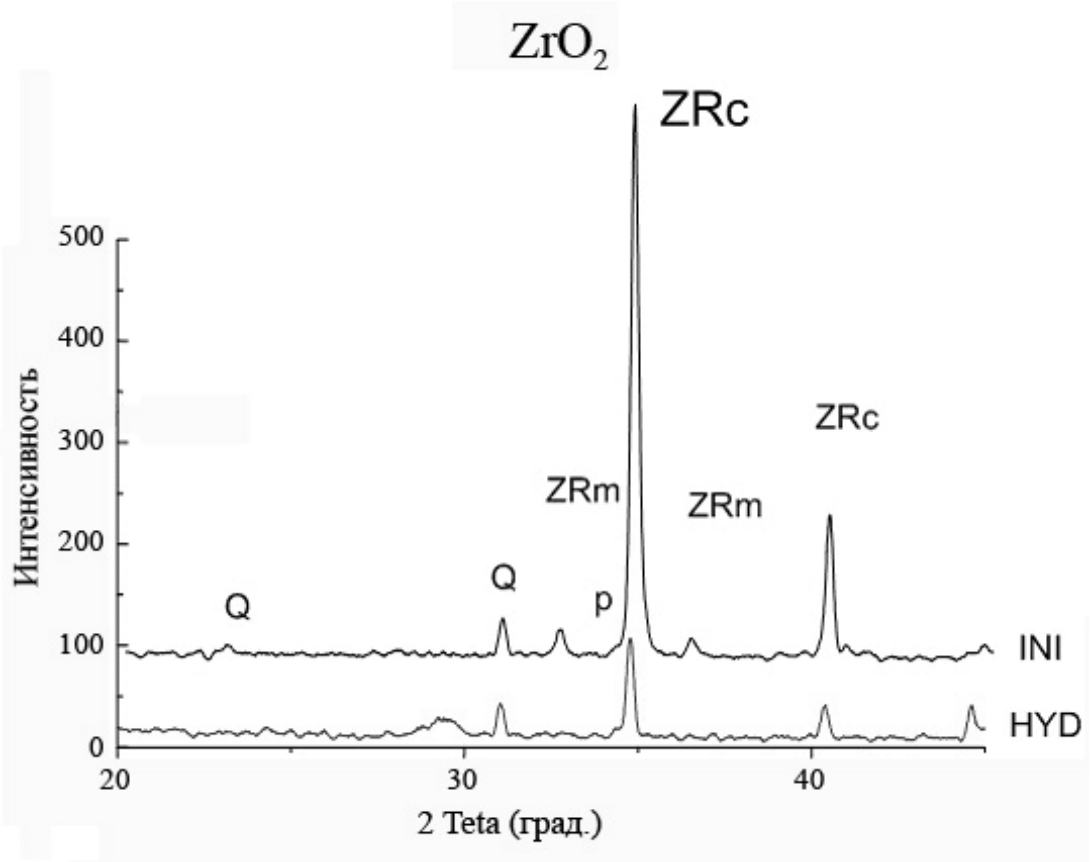


Рис. 33. Рентгеновский спектр Pu-содержащей керамики на основе диоксида циркония:

INI – исходное состояние; HYD – образец после эксперимента № 2.

Таблица 12

Фазовый состав Pu-содержащей керамики на основе диоксида циркония: (эксперимент № 2)

Фаза	**Содержание в образце (масс. %)**	
	Исходный (INI)	**Измененный (HYD)**
ZrO_2, куб./ZRc	90	100
ZrO_2, мон./ZRm	10	-?
PuO_2/p	менее 1	-?

Примечание: количество измененной керамики, использованной для проведения рентгенофазового анализа было значительно меньше, чем неизменной. Это привело к нечеткой идентификации и определению количества мон. ZrO_2 в измененном порошке.

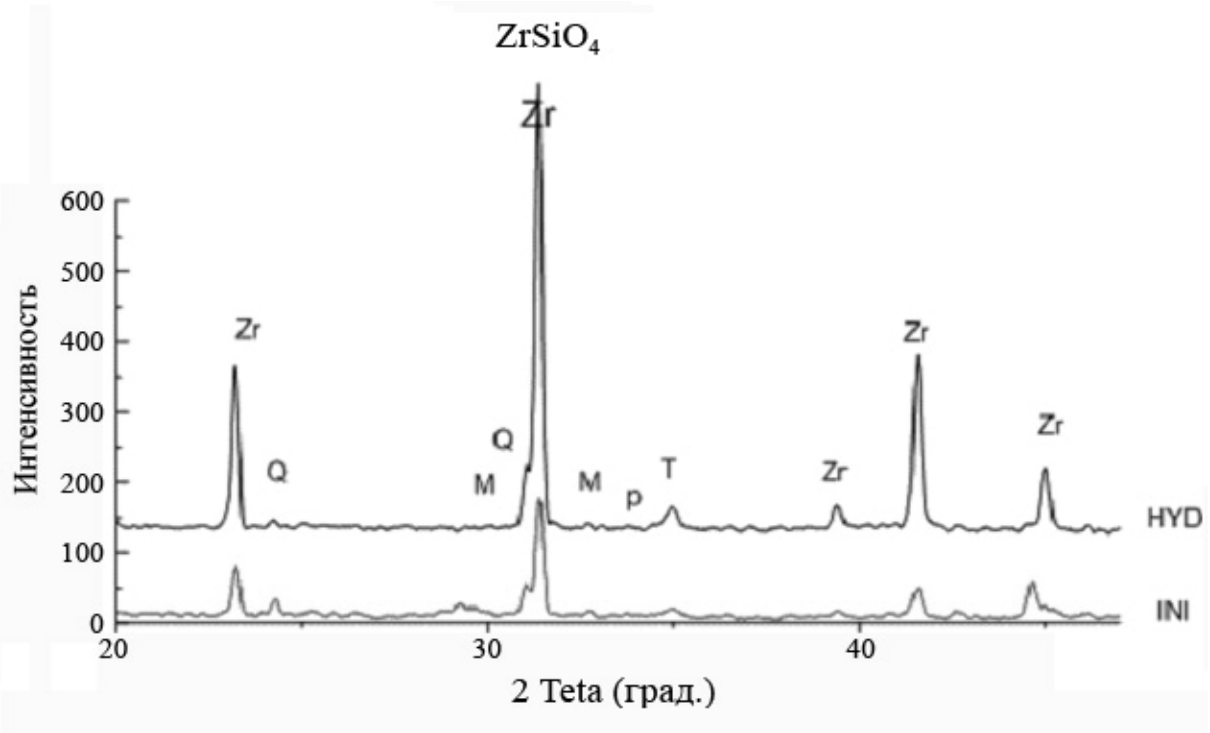


Рис. 34. Рентгеновский спектр Pu-содержащей керамики на основе циркона и диоксида циркония:
INI – исходное состояние; HYD – образец после эксперимента № 2.

Таблица 13

Фазовый состав Pu-содержащей керамики на основе циркона и диоксида циркония (эксперимент № 2)

Фаза	**Содержание в образце (масс.%)**	
	исходный (INI)	**измененный (HYD)**
(Zr, Pu) SiO_4/Zr	85	85
ZrO_2, мон./M	5	5
ZrO_2, тетр./T	10	10
PuO_2/p	менее 1	–?

Возможно, это означает, что браннерит является наименее устойчивой фазой пирохлоровой керамики и поэтому именно с ним связан вынос U и Pu на первых стадиях эксперимента по взаимодействию с водой.

Эксперимент № 3 (3 месяца в иононасыщенном растворе при 90 °C) позволил получить понятные результаты только для керамики на основе диоксида циркония, которая продемонстрировала отсутствие каких-либо изменений в фазовом составе (рис. 37). Высокий фон на рентгеновских дифрактограммах не дал возможности выявить и идентифицировать новообразованные фазы в образцах цирконовой и пирохлоровой керамик (рис. 35, 36). После эксперимента № 3 были проанализированы на содержание Am и Pu и водные растворы (отфильтрованные через фильтр с размером пор ≤ 1мк) и частицы гранита, тщательно промытые в дистиллированной воде (табл. 14). Интересно заметить, что в пробах из всех растворов содержание Am оказалось близким (приблизительно $n \cdot 10^2$ Бк/мл), так же как и количество Am, сорбированного на частицах гранита (приблизительно $n \cdot 10^5$ Бк/г). Содержание Pu сильно варьирует: на три порядка для растворов и на один порядок для Pu, сорбированного на граните. Интерпретация данных по Pu затруднена, так как предполагается, что он в этих растворах присутствует главным образом в коллоидной форме.

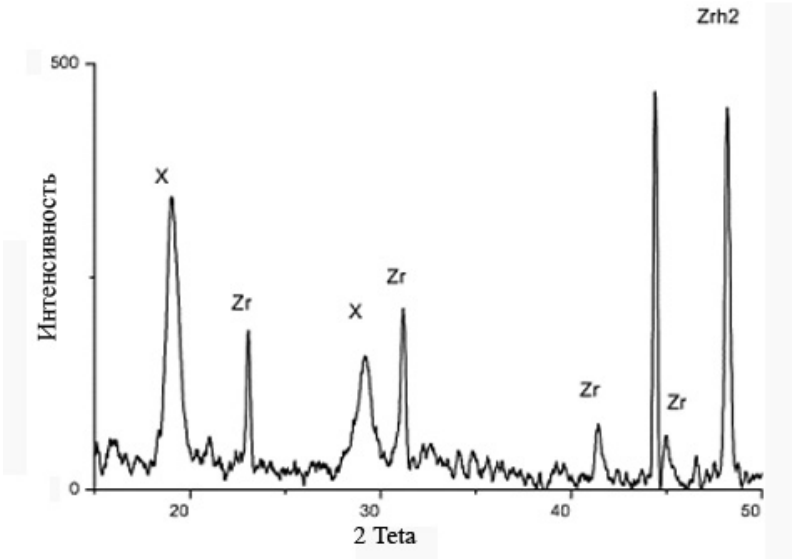


Рис. 35. Рентгеновский спектр Pu-содержащей цирконовой керамики после эксперимента № 3. Высокий фон не позволяет идентифицировать никакие фазы, кроме циркона. Пики X, возможно, соответствуют компонентам клея в держателе образца.

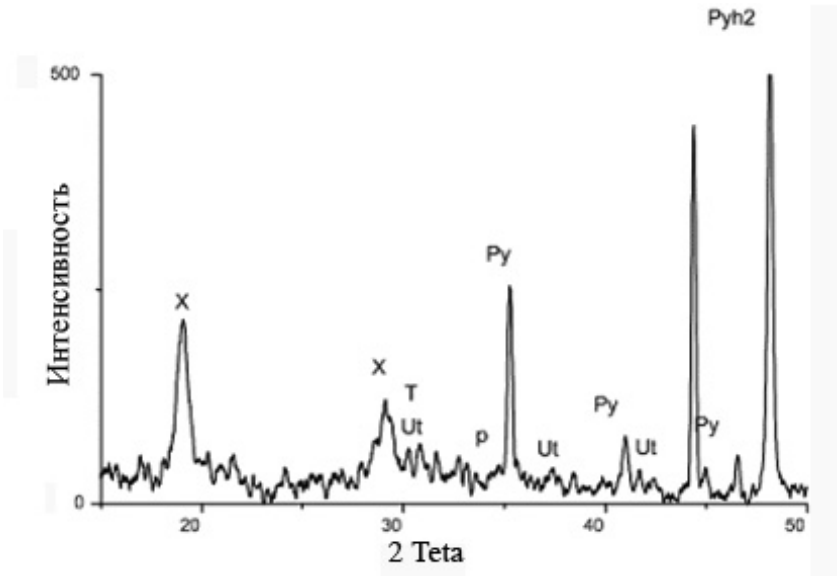


Рис. 36. Рентгеновский спектр Pu-содержащей пиохлоровой керамики после эксперимента № 3. Повышенный фон позволяет идентифицировать только пирохлор (Py), браннерит (Ut) и рутил (T). Пики X, возможно, соответствуют компонентам клея в держателе образца.

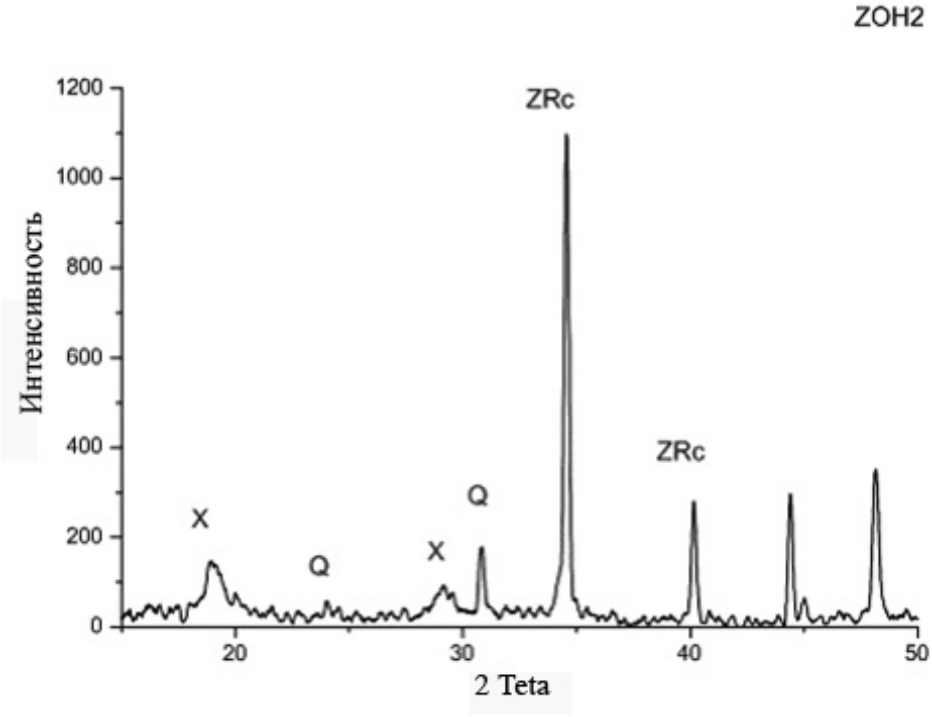


Рис. 37. Рентгеновский спектр Pu-содержащей керамики на основе диоксида циркония после эксперимента № 3: наблюдаются только кубический диоксид циркония (ZRc) и внутренний стандарт – кварц (Q). Неидентифицированные пики X соответствуют, вероятно, компонентам клея в держателе образца.

Таблица 14

Содержание Pu и Am в растворах и сорбированных на зернах гранита после эксперимента № 3

Образцы Pu керамики	Содержание радионуклидов			
	в растворе (Бк/мл)		на частицах гранита (Бк/г)	
	Pu	Am	Pu	Am
пирохлор (9,8-9,9 масс.% Pu и 0,1-0,2 масс.% Am)	$6{,}0\cdot10^{1}$	$1{,}3\cdot10^{2}$	$1{,}4\cdot10^{5}$	$3{,}4\cdot10^{5}$
диоксид Zr (9,8-9,9 масс.% Pu и 0,1-0,2 масс.% Am)	$3{,}2\cdot10^{2}$	$1{,}3\cdot10^{2}$	$2{,}6\cdot10^{4}$	$5{,}9\cdot10^{5}$
циркон (5-6 масс.% Pu и 0,04-0,05 масс.% Am)	$2{,}1\cdot10^{3}$	$4{,}2\cdot10^{2}$	$6{,}8\cdot10^{5}$	$1{,}3\cdot10^{5}$

Полученные результаты позволяют составить следующие рекомендации по синтезу керамики для иммобилизации актиноидов в промышленных масштабах:

1. Методы синтеза керамики на основе циркон/диоксида циркония и диоксида циркония, не использующие прессование и базирующиеся на прокаливании на воздухе, являются более предпочтительными, принимая во внимание, что достаточно приемлемое количество образцов, допированных имитаторами, было успешно получено в лабораторных условиях.
2. Существует несколько перспективных путей для упрощения первичной стадии приготовления исходного материала, такие как получение соосажденных оксалатов циркония – актиноидов и плазменная кальцинация любых исходных смесей (оксалатов, АГСЦ и т. д.). Использование плазменной кальцинации помогает избежать образования самостоятельных актиноидных фаз во время конечного синтеза керамики.

В любом случае, предварительно стабилизированные и полностью гомогенные актиноидсодержащие соединения, как соосажденные оксалаты, отвержденный гель (АГСЦ), полученный из обычных растворов, лучше с точки зрения приготовления шихты, чем отдельные порошки оксидов.

Заключение

Результаты проведенных исследований позволяют сделать ряд выводов:

1. В Радиевом институте в 1995-2005 гг. были проведены десятки успешных экспериментов по синтезу Pu-Am-содержащих керамик в условиях перчаточных боксов. Было синтезировано и изучено множество актиноидсодержащих кристаллических образцов. При этом ни один эксперимент не привел к загрязнению даже внутренних стенок перчаточных боксов, несмотря на значительные количества использовавшихся Pu и Am.
2. Экспериментально было показано, что актиноидсодержащие керамические матрицы могут быть успешно синтезированы экономически приемлемыми методами (спекание или плавление на воздухе) без образования самостоятельных фаз актинидов.
3. Состав керамик на основе циркона, кубического диоксида циркония, граната и перовскита может изменяться для обеспечения инкорпорирования широкого ряда актинидных отходов, начиная от почти чистого оружейного Pu до Pu-

Am-Np-Cm-отходов сложного химического состава ПО «Маяк» и ГХК, включая жидкие неразделенные ВАО. При этом сохраняется геохимическое подобие актиноидсодержащих кристаллических фаз устойчивым природным акцессорным минералам, типичным для гранитоидов Нижнеканского массива.

4. Накопленный в Радиевом институте опыт по синтезу различных типов керамик может быть успешно применен в различных областях промышленности: в производстве керамических фильтров и огнеупорных материалов; создании источников альфа-излучения с особо устойчивыми матрицами для работы в агрессивных средах; разработке самосветящихся инертных материалов и т.д.

Список литературы

1. Galkin B. Ya., Esimantovskiy V. M., Lazarev L. N. et. al. Extraction of Cesium and Strontium, REE and TRU from Liquid Volatile Waste by Means of an Extractant Based on Dicarboxylate of Cobalt. / Proceedings of International Solvent Extraction Conference ISEC-88, 1988, Moscow, Russia.
2. Law J. D., Brewer K. N., Smirnov I. V., Dzekun E. G., Herbst R. S., Romanovskiy V. N., Babain V. A., Todd T. A., Esimantovskiy V. M., Zaitsev B. N. Collaborative Flowsheet Development Studies Using Cobalt Dicarbollide and Phosphine Oxide for the Partitioning of Radionuclides from Idaho Chemical Processing Plant High-Activity Liquid Waste with Centrifugal Contactors. / Proceedings of the International Topical Meeting on Nuclear and Hazardous Waste Management SPECTRUM-96, 1996, Seattle, Washington, USA, 18-23.08.1996, p. 2308-2313.
3. Todd T. A., Brewer K. N., Law J. D., Wood D. J., Herbst R. S., Romanovskiy V. N., Esimantovskiy V. M., Smirnov I. V., Babain V. A. Development of Universal Solvent for the Decontamination of Acidic Liquid Radioactive Wastes. / Booklet of Abstracts, 13th International Radiochemical Conference RADIOCHEMIE-98, 1998, Marianske Lazne-Jachymov, Czech Republic, 19-24/04/1998, p. 379.
4. Carroll D. F. The System PuO_2-ZrO_2 / Journal of The American Ceramic Society – Discussions and Notes, 1963, v. 46, No. 4, p. 194-195.
5. Heimann R. B., Vandergraaf T. T. Cubic Zirconia as a Candidate Waste Form for Actinides: Dissolution Studies / Journal of Materials Science Letters 7, p. 583-586.
6. Anderson E. B., Burakov B. E., Pazukhin E. M. High-Uranium Zircon from «Chernobyl Lavas» / Radiochimica Acta, 1993, 60, p. 149-151.
7. Burakov B. E. A Study of High-Uranium Technogenous Zircon (Zr, U) SiO_4 from Chernobyl «Lavas» in Connection with the Problem of Creating a Crystalline Matrix for High-Level Waste Disposal / Proceedings of International Conference SAFE WASTE -93, 13-18/06/1993, Avignon, France, v. 2, p. 19-28.
8. Anderson E. B., Burakov E. B., Vasiliev V. G. A Creation of Crystalline Matrix for Actinide Waste in Khlopin Radium Institute / Proceedings of International Conference SAFE WASTE-93, 13-18/06/1993, Avignon, France, v. 2, p. 29-33.
9. Anderson E. B., Burakov B. E., Galkin B. Ya. et al. UK-Russian Collaboration High Level Waste Immobilization Studies. Proceedings of the International Conference Global -95, Versailles, France, 11-14/09/1995, v. 1, p. 216-223.
10. Kuramoto K-I., Makino Y., Yanagi T., Muraoka S., Ito Y. Development of Zirconia- and Alumina-Based Ceramic Waste Forms for High Concentrated TRU Elements / Proceedings of the International Conference Global-95, Versailles, France, 11-14/09/1995, v. 2, p. 1838-1845.
11. Ewing R. C., Lutze W., Weber W. J. Zircon: A Host-Phase for the Disposal of Weapons Plutonium / Journal of Material Research, 1995, v. 10, p. 243-246.
12. Ewing R. C., Weber W. J., Lutze W. Crystalline Ceramics: Waste Forms for the Disposal of Weapons Plutonium. / Eds. E. R. Merz and C. E. Walter Disposal of Weapon Plutonium, 1996, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 65-83.

13. Burakov B. E., Anderson E. B., Galkin B. Ya., Starchenko V. A., Vasiliev V. G. The Crystalline Host-Phases for Immobilization of Weapons Plutonium and Waste Actinides. / Eds. E. R. Merz and C. E. Walter Disposal of Weapon Plutonium, 1996, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, p. 85-89.
14. Furuya H., Muraoka S., Muromura T. Feasibility of Rock-Like Fuel and Glass Waste Form for Disposal of Weapons Plutonium. / Eds. E. R. Merz and C. E. Walter Disposal of Weapon Plutonium, 1996, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, p. 107-121.
15. Burakov B. E., Anderson E. B., Shabalev S. I. A Search of the Most Optimal Forms of the Solidification of High-Level Waste Geologically Compatible with Hosting Granitoid Rocks. Defence Nuclear Waste Disposal in Russia, / Eds. M. J. Stenhouse and V. I. Kirko, 1998, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 59-68.
16. Burakov B. E., Anderson E. B., Rovsha S. I. et al. Synthesis of Zircon for Immobilization of Actinides. Materials Research Society Symposium / Proceedings Scientific Basis for Nuclear Waste Management XIX, 1996, v. 412, p. 33-39.
17. Helean K. B., Burakov B. E., Anderson E. B. et al. Mineralogical and Microtextural Characterization of «Gel-Zircon» from the Manibay Uranium Mine, Kazakhstan. Materials Research Society Symposium Proceedings Scientific Basis for Nuclear Waste Management XX, 1997, v. 465, p. 1219-1226.
18. Burakov B. E., Helean K. B., Anderson E. B., Ewing R. C. Amorphous Zirconium Hydrosilicate (AZHS) – a Prospective Material for Plutonium Fixation. / Transactions of the International Conference Plutonium Futures – the Science, Santa-Fe, New-Mexico, USA, 25-27/08/1997, p. 21.
19. Burakov B. E., Helean K. B., Korolev V. A., Ewing R. C., Anderson E. B. et al. Synthesis of Actinide-Doped Zirconia by Plasma Calcination. Material Research Society Symposium Proceedings Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXI, 1998, v. 506, p. 95-100.
20. Ushakov S. V., Burakov B. E., Garbuzov V. M., Anderson E. B. et al. Synthesis of Ce-Doped Zircon by a Sol-Gel Process. / Material Research Society Symposium Proceedings Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXI, 1998, v. 506, p. 281-288.
21. Burakov B. E., Strykanova E. E. Garnet Solid Solution of $Y_3Al_5O_{12}$-$Gd_3Ga_5O_{12}$-$Y_3Ga_5O_{12}$ (YAG-GGG-YGG) as a Prospective Crystalline Host-Phase for Pu Immobilization in the Presence of Ga. / Proceedings of the International Conference Waste Management'98, 1998, Tucson, Arizona, USA, 1-5/03/1998, CD version, http://localhost:6017/html/sess34/34-05/34-05. htm.
22. Burakov B. E. et al. Ceramic Forms for Immobilizing Pu Using Zr, Y, Al Metal Additives. / Environmental Issues and Waste Management Technologies IV, 1999, p. 349-356.
23. Degueldre C., Heimgartner P., Ledergerber G. et al. Behaviour of Zirconia Based Fuel Material under Xe Irradiation. / Material Research Society Symposium Proceedings Scientific Basis for Nuclear Waste Management XX, 1997, v. 439, p. 625-632.
24. Kinoshita H., Kuramoto K., Uno M., Yamanaka S. Mitamura H., Banba T. Phase Stability and Mechanical Property of Yttria-Stabilized Zirconia Form for Partitioned TRU Wastes. / Proceedings of the 2nd NUCEF International Symposium NUCEF'98, 16-17/11/98, Hitachinaka, Ibaraki, Japan, JAERI-Conf.99-004 (Part I), 307-326.
25. Burakov B. E., Anderson E. B. Development of Crystalline Ceramic for Immobilization of TRU Wastes in V. G. Khlopin Radium Institute. / Proceedings of the 2nd NUCEF International Symposium NUCEF'98, 16-17/11/98, Hitachinaka, Ibaraki, Japan, JAERI-Conf. 99-004 (Part I), p. 295-306.
26. Gong W. L., Lutze W., Ewing R. C. Zirconia – a Ceramic for Excess Weapons Plutonium Wastes. Material Research Society Symposium / Proceedings Scientific Basis for Nuclear Waste Management, 1999, v. 556, p. 63
27. Krylova L. Ya. Features of geochemistry of iodine in rare-metal granite pegmatites. / Problems of Geochemistry and Typomorphism of Minerlas, Leningrad, 1978, Issue 2, p. 36-41 (in Russian).

28. Tourmaline. (X-ray diffraction and typomorphism) /Edited by Vasiliev E. K., 1990, Novosibirsk (in Russian).
29. Kuzmin V. I., Dobrovolskaya N. V., Solntzeva L. S. Tourmaline and its application at prospecting and valuation works. / 1979, Moscow (in Russian).
30. Frondel C., Huribut C. S., Collette Jr. et al. Synthesis of tourmaline / Amer. Mineralogist., 1947, v. 32, p. 680-681.
31. Smith F. G. Transport and deposition of the non-sulphide vein minerals. IV. Tourmaline / Econ. Geology, 1949, v. 44, p. 186-192.
32. Michel-Levy M. / Bull. Soc. Franc. Min. Crist., 1953, v. 76, p. 236.
33. Frondel C., Collette R. L. / Amer. Mineralogist, 1957, v. 42, p. 754.
34. Taylor A. M., Terrell B. C. Synthetic tourmalines containing elements of the first transition series / Journ. of Cryst. Growth. 1967, v. 1, p. 238-244.
35. Emel'yanova E. N., Zigareva T. A. Growth of tourmaline in hydrothermal conditions. Crystallography, 1960, v. 5, issue 6, p. 955-956 (in Russian).
36. Voskresenskaya I. E. Concerning some properties of synthetic tourmaline / Mineral. Coll. of Lvov State University, 1965, v. 19, issue 2, p. 164-171 (in Russian).
37. Voskresenskaya I. E., Barsukova M. L. Synthesis and properties of some iron- and iron-free- tourmalines / Hydrothermal synthesis of crystals, Moscow, 1968, p.175-192 (in Russian).
38. Voskresenskaya I. E., Schternberg A. A. Synthesis of tourmaline in chloride systrems / Crystallography, 1973, v. 18, issue 4, p. 888-890 (in Russian).
39. Voskresenskaya I. E., Ivanova T. N. Study of tourmalines produced by synthesis method / Works of Mineralogical museum of A. E. Fersman, 1975, issue 24, p. 20-30 (in Russian).

Development of Crystalline Matrix Phases for the Immobilization of Actinides

B. E. Burakov, E. B. Anderson, M. V. Zamoryanskaya, V. M. Garbuzov, A. A. Kitsai, V. A. Zirlin, A. Ju. Alexeev

The main objectives of our research were the choice, scientific substantiation, and development of optimal methods for synthesizing the most stable materials suitable for final immobilization of the most dangerous long-lived radionuclides, including redundant weapon plutonium ^{239}Pu (WPu) and the actinide fraction of high-level radioactive wastes (Pu, Np, Am, Cm). Various options for final immobilization were proposed, including disposal in deep geological formations (^{239}Pu, actinides, iodine-129), transmutation (actinides), and use as mineral-like nuclear fuel (^{239}Pu).

The concept of using crystalline materials to immobilize high-level radioactive wastes (HLW) has been developed by numerous contributors since it was first proposed in 1953. However, the majority of developments (for example, Synroc) were based on immobilization of unseparated HLW mixtures.

Existing technologies in Russia assume reprocessing of spent fuel and separation of high-level wastes into fractions, which requires new approach to creating crystalline solidification forms. Main attention was paid to developing and testing the crystalline solidification forms for the actinide fraction of HLW and immobilization of weapon plutonium. The investigations conducted at the Radium Institute have demonstrated the basic possibility of immobilization of the actinide fraction of HLW in mono-phase ceramics based on the cubic modification of zirconium dioxide. For the first time ever the immobilization of plutonium and actinides into matrix based on zircon, $ZrSiO_4$, was proposed and justified. The stability of zircon in various geochemical environments over billions of years is the best evidence in favor of promising developments of zircon-based crystalline matrices.

Содержание

Предисловие. *Е.Б. Андерсон, В.Н. Романовский* 3

Результаты поисковых и научно-исследовательских работ по выбору площадок для подземной изоляции ВАО и ОЯТ на Нижнеканском массиве гранитоидов (Южно-Енисейский кряж). *Е.Б. Андерсон, В.Г. Савоненков, Е.Ф. Любцева, С.И. Шабалев, Ю.М. Рогозин, Н.Л. Алексеев* 8

Введение 9

1. Глобальные геологические структуры 10

2. Геологическое строение Южно-Енисейского кряжа 11

3. Нижнеканский гранитоидный массив 16

3.1. Физико-географические условия 19

3.2. Формирование и геологическое строение массива 20

3.3. Минералого-петрографическая характеристика гранитоидов 22

3.4. Тектоника 26

3.5. Гидрология и гидрогеология 31

3.6. Барьерные свойства гранитоидов 34

4. Основные итоги проведенных исследований 43

5. Основные нерешенные проблемы 47

Заключение 56

Список литературы 57

Синтез кристаллических матриц для иммобилизации актиноидов. *Б.Е. Бураков, Е.Б. Андерсон, М.В. Заморянская, В.М. Гарбузов, А.А. Кицай, В.А. Цирлин, А.Ю. Алексеев* 65

Введение 65

1. Керамика на основе циркона и диоксид циркония 69

2. Керамика на основе кубического диоксида циркония 81

3. Керамика на основе пирохлора 83

4. Керамика на основе граната и перовскита 86

5. Методы анализа 87

Список литературы 102

Перспективы создания подземных могильников РАО в нижнекембрийских глинах Ленинградской области. *Е.Б. Андерсон, В.Г. Савоненков, С.И. Шабалев*.....105

Введение.....105

1. Общие сведения о территории распространения нижнекембрийских глин в центральной части Ленинградской области.....107

1.1. Географическое и административно-территориальное положение.....107

1.2. Рельеф территории.....108

1.3. Гидрографическая сеть.....110

1.4. Климатические условия.....111

2. Геологическое строение юго-западной части Ленинградской области.....112

3. Гидрогеологические условия.....116

4. Тектоника и особенности современных геодинамических процессов.....118

4.1. Особенности тектонического развития нижнекембрийских глин.....121

5. Сейсмичность.....122

6. Критерии выбора перспективных участков.....123

7. Обзор перспективных участков.....125

8. Основные свойства глин.....127

Заключение.....129

Литература.....129

ТРУДЫ
РАДИЕВОГО ИНСТИТУТА
им. В.Г. ХЛОПИНА

ТОМ XI

Ответственный за выпуск: Ю.Л. Каминский
Технический редактор: О.Д. Федорова
Компьютерное исполнение: В.Г. Богданов

Заказ №	Подписано к печати	Печать офсетная	Формат бумаги 60×84 1/8
Усл. печ. л.	Уч.-изд. л.	Цена договорная	Тираж 150 экз.

Отпечатано в типографии ПИЯФ РАН
188300, Гатчина Ленинградской обл. Орлова роща