

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПУНКТОВ ГЛУБИННОГО ЗАХОРОНЕНИЯ ЖРО

А. Н. Дорофеев¹, А. В. Познизов², А. И. Рыбальченко, Е. В. Захарова³, А. А. Зубков⁴,
П. М. Верещагин², А. Л. Василишин², Д. В. Мурлис², Р. Б. Шарафутдинов²,
Е. А. Савельева⁵, В. В. Сускин⁵

¹Государственная корпорация «Росатом», Москва

²ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва

³Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва

⁴АО «Сибирский химических комбинат», Северск, Томская область

⁵Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 20 октября 2022 г.

В статье приведен обзор результатов, полученных при выполнении отдельных пунктов «Программы расчетно-экспериментальных исследований по обоснованию и оценке долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов в целях реализации рекомендаций миссии МАГАТЭ «Международное экспертное рассмотрение практики глубокой закачки жидких радиоактивных отходов в Российской Федерации». В рамках данной программы для пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов (далее – ПГЗ ЖРО) «Железногорский», «Северский» и «Димитровградский» собрана и систематизирована информация о геолого-гидрогеологических условиях районов и площадок размещения; изучены процессы, происходящие в ближней и дальней зонах, включая участвующие в переносе компонентов радиоактивных отходов (далее – РАО), разработаны сценарии эволюции системы захоронения РАО, в том числе выполнен прогноз изменения климата районов размещения на период до 100 000 лет; разработаны концептуальные и математические модели; с использованием программ для ЭВМ выполнены прогнозные расчеты миграции компонентов жидких РАО (далее – ЖРО) в эксплуатационных горизонтах и оценено радиационное воздействие на население. Проведены расчетно-экспериментальные исследования эволюции тампонажных материалов с целью создания дополнительных инженерных барьеров безопасности при ликвидации скважин ПГЗ ЖРО; представлены подходы к разработке концепции их закрытия.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, жидкие радиоактивные отходы, пункт глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов, обоснование безопасности.

Введение

В 2013 году в Российской Федерации была проведена миссия МАГАТЭ «Международное экспертное рассмотрение практики глубокой закачки жидких радиоактивных отходов в Российской Федерации». Ее основная цель заключалась в рассмотрении соответствия подходов

к обеспечению безопасности российской практики захоронения ЖРО, осуществляемой путем их контролируемого нагнетания в глубокие геологические горизонты, требованиям безопасности МАГАТЭ. Такая практика захоронения с 1967 года осуществляется на трех ПГЗ

ЖРО, расположенных рядом с г. Железногорск (Красноярский край), г. Северск (Томская область) и г. Димитровград (Ульяновская область) и эксплуатируемых в настоящее время филиалами Федерального государственного унитарного предприятия «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (ФГУП «НО РАО»). Реализация данной практики захоронения позволила обеспечить безопасную изоляцию ЖРО, образующихся на предприятиях атомной промышленности ФГУП «ГХК», АО «СХК» и АО «ГНЦ НИИАР», от окружающей среды и человека.

Российскими специалистами для предоставления международным экспертам в рамках миссии МАГАТЭ были подготовлены материалы по оценке безопасности технологии глубинного захоронения ЖРО, содержащие основные аспекты обеспечения безопасности ПГЗ ЖРО [1].

Группа международных экспертов МАГАТЭ рассмотрела материалы, предоставленные российской стороной, на предмет их соответствия требованиям стандарта МАГАТЭ SSR-5 «Захоронение радиоактивных отходов. Конкретные требования безопасности» [2]. В 2015 году международные эксперты подготовили и передали рекомендации и предложения по совершенствованию обоснования безопасности практики глубинного захоронения ЖРО, в том числе долговременной безопасности ПГЗ ЖРО после закрытия. Результаты работы международных экспертов были опубликованы позднее (в 2020 году) в отчете [3].

Основные рекомендации экспертов миссии МАГАТЭ касались следующего:

- отмечено отсутствие полноты и системности при описании гидрогеологических свойств ПГЗ ЖРО, геохимических процессов и свойств геологических новообразований, при определении набора характеристик, используемых для обоснования безопасности;
- указано, что не оценена значимость физико-химических, микробиологических и других процессов, протекающих в системе захоронения РАО;
- установлено, что не обоснованы сценарии эволюции системы захоронения РАО с учетом эволюции климата и геологической среды в период эксплуатации ПГЗ ЖРО и после закрытия. Отдельно не рассмотрен сценарий случайного (непреднамеренного) вторжения человека в систему захоронения РАО, а также сценарий разгерметизации некоторого количества ликвидированных скважин в период после закрытия ПГЗ ЖРО;

- по мнению экспертов, концептуальные и математические модели ПГЗ ЖРО разработаны без учета некоторых протекающих в них процессов. Рекомендуется реализовать математические модели с использованием программ для ЭВМ и выполнить верификацию и анализ чувствительности моделей;
- прогнозные расчеты по оценке долговременной безопасности ПГЗ ЖРО рекомендуется выполнить с учетом анализа неопределенностей;
- рекомендуется разработать подробную концепцию закрытия ПГЗ ЖРО с обоснованием выбора материалов для ликвидации скважин, а также объема и времени проведения долговременного мониторинга системы захоронения РАО.

С целью учета данных рекомендаций в 2015 году организациями атомной отрасли, научными и проектными институтами была разработана «Программа расчетно-экспериментальных исследований по обоснованию и оценке долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов в целях реализации рекомендаций миссии МАГАТЭ «Международное экспертное рассмотрение практики глубокой закачки жидких радиоактивных отходов в Российской Федерации» и обоснования концепции их закрытия» (далее — Программа). Программа согласована с Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) и утверждена Госкорпорацией «Росатом» [4].

Для реализации Программы в части своих компетенций были привлечены организации: Госкорпорации «Росатом» (ФГУП «НО РАО», АО «ВНИПИпромтехнологии», АО «СХК»), научно-технической поддержки Ростехнадзора (ФБУ «НТЦ ЯРБ»), Российской академии наук (ИБРАЭ РАН и ИФХЭ РАН), Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Национальный исследовательский университет «Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ)), Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля).

В настоящей статье представлен обзор основных результатов реализации Программы.

Сбор и систематизация данных для оценки долговременной безопасности ПГЗ ЖРО

С целью учета рекомендаций экспертов миссии МАГАТЭ, связанных с отсутствием полноты и системности при описании геологических и гидрогеологических свойств районов и

площадок размещения ПГЗ ЖРО, а также при определении набора характеристик, используемых для обоснования безопасности, была собрана, проанализирована и систематизирована информация и сведения об основных характеристиках зданий, сооружений, систем и элементов ПГЗ ЖРО, в том числе информация об условиях районов и площадок размещения ПГЗ ЖРО, эксплуатируемых филиалами ФГУП «НО РАО» «Железногорский», «Северский» и «Димитровградский». Проанализировано свыше 1000 различных источников за период времени с 1973 по 2017 год, что позволило детализировать следующие данные:

- географические, метеорологические и геологические характеристики районов размещения ПГЗ ЖРО;
- характеристики площадок размещения ПГЗ ЖРО, по результатам геологических и гидрогеологических исследований, в том числе опытно-фильтрационных работ, физико-химического анализа образцов пород и подземных вод;
- схемы расположения зданий и сооружений, систем и элементов в пределах площадок размещения ПГЗ ЖРО;
- свойства материалов и конструкционные особенности инженерных барьеров безопасности (далее — ИББ), с учетом результатов ранее выполненных исследований их изоляционных свойств;
- радионуклидный и химический состав ЖРО, в том числе наличие органических примесей;
- значимость физико-химических процессов, происходящих с участием компонентов разных типов ЖРО и пород эксплуатационных горизонтов;
- роль микробных сообществ в преобразовании и трансформации макрокомпонентов отходов и радионуклидов.

Полученные результаты были использованы для детализации сценария наиболее вероятной геологической и геохимической эволюции структуры и свойств геологической среды в районах размещения ПГЗ ЖРО, а также климатических изменений данных районов.

Получение дополнительных экспериментальных данных

В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ [3] были подготовлены программы экспериментальных исследований по направлениям: «изменение характеристик ПГЗ ЖРО за период эксплуатации», «процессы, связанные с коллоидным переносом» и «микробиологические

процессы». В рамках проведения работ по этим программам были отобраны пробы пластовых вод на ПГЗ ЖРО «Железногорский» и «Северский» и направлены для исследований в ИФХЭ РАН.

На основании результатов экспериментального моделирования процессов, происходящих в условиях ПГЗ ЖРО, подтверждены и систематизированы данные о формировании в эксплуатационных горизонтах новообразованных сорбционно-активных фаз с участием продуктов деструкции пород и компонентов ЖРО (Fe, Si-содержащие фазы, вторичные глинистые минералы). Установлено, что направленность процесса техногенного минералообразования (состав и свойства новообразованных фаз) зависит от типа ЖРО, температуры и pH-Eh-условий в эксплуатационном горизонте. Таким образом, в процессе долговременной эксплуатации ПГЗ ЖРО происходит образование техногенных «противомиграционных барьеров».

По результатам исследований отобранных проб пластовых жидкостей подтверждено присутствие в эксплуатационных горизонтах ПГЗ ЖРО коллоидных частиц. Установлено, что на их подвижность влияют процессы, происходящие в эксплуатационных горизонтах (выщелачивание и осаждение компонентов пород, изменение состава и значений pH-Eh пластовых вод). Таким образом, нельзя не учитывать присутствие коллоидных форм радионуклидов при обосновании долговременных последствий подземного захоронения ЖРО. Важным результатом работы является подтверждение ранее наблюдавшейся закономерности: при распространении разных типов ЖРО по эксплуатационному горизонту в процессе сорбции уменьшается содержание радионуклидов и одновременно снижается содержание коллоидных форм радионуклидов, том числе наиболее мобильных коллоидов актинидов.

По результатам микробиологических исследований проб было установлено увеличение численности денитрифицирующих бактерий, способствующих восстановлению нитрата до молекулярного азота при увеличении концентрации нитрат-ионов, одного из основных компонентов ЖРО. Так, в наиболее загрязненной нитратами пробе было обнаружено наибольшее количество бактерий рода *Pseudomonas*, способных восстанавливать нитраты и другие элементы в высших степенях окисления. В пробах также были обнаружены микроорганизмы, способные восстанавливать сульфат-ионы до сероводорода, что приводит к смещению редокс-условий в подземных водах в восстановительную область

за счет удаления макрокомпонентов — окислителей. Таким образом, микробные процессы будут способствовать удалению макрокомпонентов ЖРО (нитрат- и сульфат-ионов) и повышению содержания малоподвижных восстановленных форм долгоживущих радионуклидов.

Разработка сценариев эволюции системы захоронения РАО

Одним из важных этапов оценки долговременной безопасности является анализ всех характеристик, процессов и событий, которые могут повлиять на безопасность системы захоронения РАО. Для учета соответствующих рекомендаций международных экспертов был выполнен анализ особенностей, событий и процессов (ОСП), происходящих при захоронении РАО на ПГЗ ЖРО [5].

Результаты анализа позволили подготовить перечни ОСП для ПГЗ ЖРО «Железногорский», «Северский» и «Димитровградский», учитывающие все факторы, потенциально влияющие на эволюцию системы захоронения РАО, и используемые при разработке сценариев эволюции системы захоронения РАО. Перечни ОСП разработаны в соответствии с международно принятым перечнем ОСП [6], [7], с учетом требований законодательства Российской Федерации и данных об ОСП, характерных для площадок размещения ПГЗ ЖРО, их систем и элементов [8], [9].

Процедура анализа ОСП для ПГЗ ЖРО состояла в отборе из списка ОСП тех факторов, которые индивидуально или в сочетании с другими влияют на долговременную безопасность системы захоронения РАО. При обосновании учета ОСП, либо возможности исключения ОСП, были учтены результаты вышеуказанных исследований микробиологических процессов и процессов коллоидного переноса радионуклидов, а также результаты изучения долговечности ИББ ПГЗ ЖРО.

Дополнительно для ОСП, важных с точки зрения обоснования безопасности ПГЗ ЖРО, был выполнен всесторонний анализ различных комбинаций и взаимосвязей между отдельными ОСП, на основании которых осуществлялась разработка сценария нормальной эволюции системы захоронения РАО и альтернативных сценариев.

Результаты анализа ОСП для ПГЗ ЖРО «Железногорский» обобщены и представлены в работе [10].

Для учета рекомендаций международных экспертов в части формирования сценариев для проведения расчетных оценок долговременной

безопасности на основе анализа ОСП для каждого ПГЗ ЖРО были разработаны и обоснованы сценарии эволюции системы захоронения РАО с учетом эволюции климата и геологической среды в период эксплуатации ПГЗ ЖРО и после ее завершения.

С целью разработки и обоснования сценариев будущей эволюции климата были разработаны проекции (прогнозные оценки) основных параметров климата (температура и осадки) на период до 100 000 лет с оценкой вероятности значений на горизонтах 1 000, 10 000, 100 000 лет для районов размещения ПГЗ ЖРО — Красноярский край, Томская и Ульяновская области. В публикациях [11], [12] представлена используемая методология разработки и полученные сценарии климатической эволюции в районах размещения ПГЗ ЖРО. На основе разработанных сценариев климатической эволюции, в том числе была выполнена оценка возможности истощения верхних водоносных горизонтов. При оценке среднесрочных сценариев (до 500—700 лет для ПГЗ ЖРО «Димитровградский» и до 3 500—4 000 лет для ПГЗ ЖРО «Северский» и «Железногорский») вероятность истощения верхних водоносных горизонтов оценена как низкая. Для оценок на долгосрочный период сценарий истощения данных горизонтов более вероятен. При этом принят к учету фактор наступления на рассматриваемые районы прифронтовой зоны ледника при очередном ледниковом периоде в течение будущих 100 000 лет. Следует, однако отметить, что с высокой вероятностью это приведет к снижению плотности населения в указанных районах, что в свою очередь должно учитываться при оценке долговременной безопасности.

При разработке сценариев геологической эволюции учтены исторические данные о геологическом развитии площадок размещения ПГЗ ЖРО и имеющиеся данные о закономерностях геологического развития земной коры, собранные при систематизации информации о районах и площадках размещения ПГЗ ЖРО.

В качестве примера можно привести краткое описание сценария геологической эволюции района размещения ПГЗ ЖРО «Железногорский».

ПГЗ ЖРО «Железногорский» в геолого-структурном отношении приурочен к южной оконечности Енисейского кряжа, представляющего собой выступ докембрийского фундамента древней Сибирской платформы.

На период до 100 000 лет в районе размещения ПГЗ ЖРО «Железногорский» будет происходить медленное устойчивое воздымание на фоне относительно спокойного геодинамического

режима, как это происходило со времени последней тектонической активизации, начавшейся 2,58 млн лет назад. Спокойный характер восходящих движений за период 2,58 млн лет фиксировался в аллювиальных отложениях террас.

Предполагается, что скорости восходящих тектонических движений на период до 100 000 лет не будут превышать скорости, которые были в зоплейстоцене-голоцене. Исходя из мощностей террас, скорости были относительно стабильными и невысокими, поскольку общая мощность енисейского аллювия в настоящее время составляет не более 18–20 м, а суммарная амплитуда вертикальных движений за постплейстоценовое время — 400–500 м, что в целом соответствует скоростям неотектонических движений. Общая высота поднятия земной поверхности в районе размещения ПГЗ ЖРО «Железногорский» на период 100 000 лет не превысит 30 м.

На период до 10 000 лет сейсмическая интенсивность района в будущем не будет превышать расчетную интенсивность прогнозного проектного землетрясения в пределах горного отвода ПГЗ ЖРО «Железногорский» для средних грунтовых условий и не будет превышать 5,6 балла. Принимается, что интенсивность максимального расчетного землетрясения в перспективе до 10 000 лет останется в пределах 7,0 баллов.

Для района размещения ПГЗ ЖРО «Железногорский» на период до 100 000 лет не ожидается проявления эндогенных геологических процессов: вулканической деятельности, магматизма, гидротермальных процессов. Прогнозируется преобладание экзогенных эрозионно-аккумулятивных процессов. Эрозионные процессы приведут к медленному разрушению горных пород, расчленению рельефа, врезанию речных долин, росту оврагов, образованию оползней. Аккумулятивные процессы будут выражаться в накоплении осадков на поверхности земли. Интенсивность экзогенных процессов будет определяться метеорологическими условиями (температурой, влажностью), а также изменением уровня поверхностных и подземных вод. Также для района размещения не прогнозируется изменение параметров тектонических деформаций, скорости вертикальных смещений не превысят 0,2 мм/год. Правобережное тектоническое нарушение (разлом) продолжит играть роль непроницаемого экрана. На период до 100 000 лет не прогнозируется увеличение скорости тектонических движений по зоне разлома, она останется такой же, как и в настоящее время — 0,02 мм/год.

При разработке сценариев деградации ИББ ПГЗ ЖРО, включая негерметичность произвольного количества скважин, учитывали, что основными ИББ на ПГЗ ЖРО, которые препятствуют проникновению компонентов ЖРО в буферный и вышележащие горизонты, являются обсадные колонны скважин (кондуктор, направление, техническая и эксплуатационная колонна) и тампонажный материал, который применяется в процессе сооружения и ликвидации скважин.

Нарушение герметичности обсадных колонн нагнетательных скважин может привести к перетеканию компонентов ЖРО в горизонты, залегающие выше эксплуатационного горизонта. Для своевременного выявления подобных осложнений в непосредственной близости от нагнетательных скважин используются наблюдательные скважины на вышележащие горизонты. Переток компонентов ЖРО в вышележащие горизонты ПГЗ ЖРО может возникнуть, если цементный камень в затрубном пространстве обсадной колонны скважины отсутствует или его изолирующая способность по каким-либо причинам ухудшилась (рис. 1).

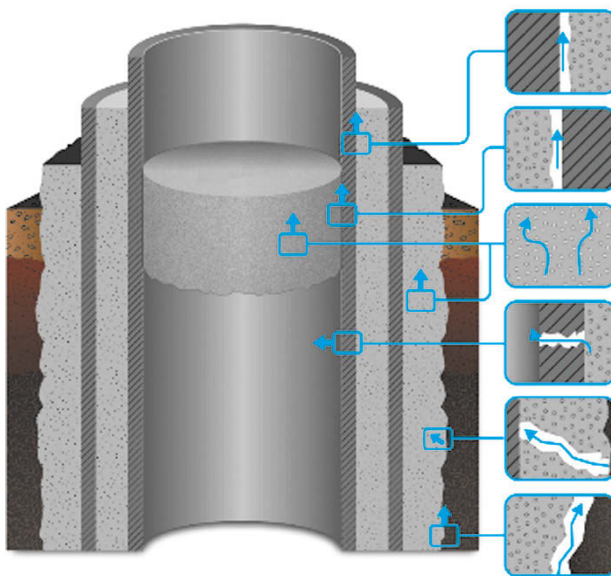


Рис. 1. Схема образования перетоков в скважинах

При реализации сценария деградации ИББ на ПГЗ ЖРО учитывали возможную разгерметизацию скважин, вследствие коррозии обсадных колонн или деградации материала герметизации затрубного пространства. В случае разгерметизации скважин существенное влияние на миграцию радионуклидов может оказывать затрубный переток по стволам скважин. Основной причиной появления затрубных перетоков является градиент давления, действующий по направлению из эксплуатационного горизонта

в скважину, который возникает вследствие снижения с течением времени гидростатического давления столба цементного камня. В какой-то момент времени давление столба цементного камня становится ниже пластового давления и флюид из горизонта начинает двигаться по каналам в затрубном пространстве [13].

В рамках реализации Программы были выполнены экспериментальные исследования процессов деградации тампонажных материалов в условиях рассматриваемых ПГЗ ЖРО, которые были использованы при моделировании миграции радионуклидов в системе захоронения РАО.

Сценарий «случайное (непреднамеренное) вторжение» человека в систему захоронения РАО учитывается в качестве дополнительного индикатора надежности обоснования безопасности ПГЗ ЖРО. Сценарии вторжения человека предусматривают возможность того, что в какой-то момент в будущем знания о местоположении объекта захоронения и представляемой им опасности будут утеряны, а будущие действия человека могут нарушить целостность объекта, например, путем бурения и т. п. Действия человека, которые приводят к прямому нарушению изоляции системы захоронения РАО, учитываются в сценариях вторжения человека. Действия человека, приводящие к нарушению окружающей среды за пределами системы захоронения РАО, не классифицируются как вторжение человека, поскольку они не приводят к прямому вторжению в систему захоронения РАО, приводящему к облучению человека.

Для оценки долговременной безопасности ПГЗ ЖРО предполагалось, что непреднамеренное вторжение человека в систему захоронения РАО может произойти через 300 лет после закрытия ПГЗ ЖРО (после окончания периода постэксплуатационного контроля). Прогнозные оценки на сотни и тысячи лет приводят к неизбежным неопределенностям. Одна из таких неопределенностей состоит в том, что будущие действия человека неизвестны и не могут быть предсказаны в этих временных масштабах.

Нахождение существующих площадок размещения ПГЗ ЖРО вдали от месторождений полезных ископаемых снижает вероятность вторжения человека в систему захоронения РАО в будущем. Однако, дефицит пресных вод в будущем может заставить человека прибегнуть к добыче вод из подземных горизонтов в районах размещения ПГЗ ЖРО. Таким образом, вероятность непреднамеренного вторжения человека в систему захоронения РАО не может игнорироваться при обосновании долговременной безопасности ПГЗ ЖРО.

На примере ПГЗ ЖРО «Железногорский» была рассмотрена реализация сценария непреднамеренного вторжения человека в систему захоронения РАО, связанная со следующими вариантами ведения хозяйственной деятельности:

- бурение скважин в рамках изыскательских работ;
- бурение скважин на воду для хозяйственно-бытовых целей.

Сценарий непреднамеренного вторжения человека в систему захоронения РАО реализуется после окончания периода административного контроля системы захоронения РАО, гарантирующего сохранность системы захоронения РАО от вторжения человека. Предполагается, что через 300 лет после закрытия ПГЗ ЖРО «Железногорский» ограничения на использование подземных вод не будут действовать и контроль за использованием подземных вод не будет проводиться, а информация о системе захоронения РАО к тому времени будет утеряна.

Разработка концептуальных моделей ПГЗ ЖРО

Для каждого сценария эволюции системы захоронения РАО были разработаны концептуальные модели ПГЗ ЖРО, которые представляют собой систематическое качественное описание ПГЗ ЖРО как источника радиационного воздействия на население и окружающую среду, отражающее эволюцию системы захоронения РАО.

В концептуальную модель системы захоронения РАО для ПГЗ ЖРО «Северский», «Железногорский» и «Димитровградский» входят следующие основные элементы:

- источник РАО (область нагнетания ЖРО);
- ближняя зона системы захоронения РАО;
- дальняя зона системы захоронения РАО (геосфера);
- биосфера;
- критическая группа населения.

Концептуально систему захоронения РАО с учетом выхода радионуклидов в биосферу и последующего радиационного воздействия на критическую группу населения можно представить в следующем виде (рис. 2).

Данная концептуальная модель базируется на следующих предположениях.

В процессе нагнетания ЖРО в эксплуатационный горизонт ПГЗ ЖРО происходит локализация радионуклидов в ближней зоне системы захоронения РАО. Процессы, обусловленные свойствами ЖРО и нагнетанием ЖРО в эксплуатационный горизонт, приводят к распределению радионуклидов в ближней зоне системы захоронения РАО и последующей миграции

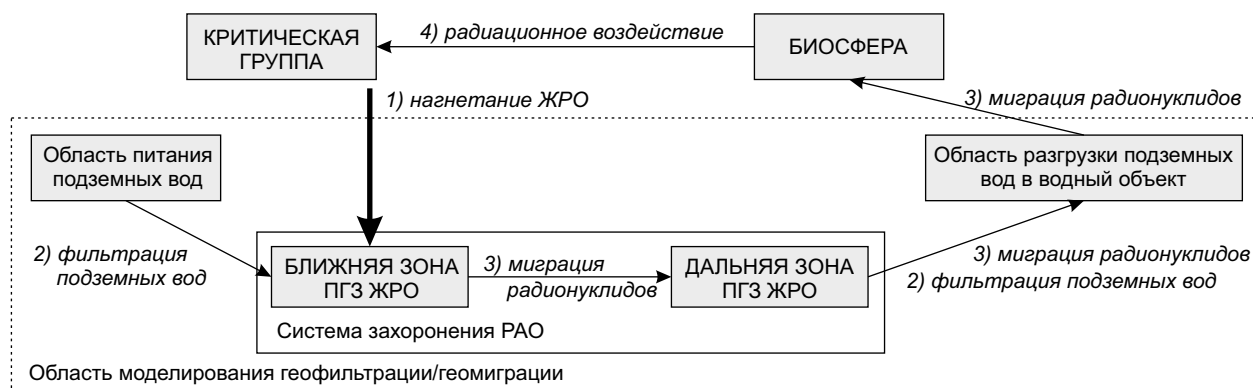


Рис. 2. Концептуальная модель ПГЗ ЖРО с указанием основных процессов

радионуклидов в дальнюю зону. В участках недр вокруг нагнетательных скважин происходят интенсивные гидродинамические, геохимические, радиационные и термодинамические процессы, связанные с захоронением ЖРО.

Эволюция ИББ системы захоронения РАО обусловлена процессами коррозии обсадных колонн скважин и деградации материалов герметизации затрубного и межтрубного пространств скважин. Для сценария нормальной эволюции системы захоронения РАО предполагается постепенное ухудшение изолирующих свойств ИББ.

Концептуальная модель, представленная на рис. 2, характеризует естественное (нормальное) эволюционное развитие системы захоронения РАО и не учитывает влияние маловероятных катастрофических воздействий на инженерные и естественные барьеры безопасности ПГЗ ЖРО.

Выполнение прогнозных расчетов с использованием программ для ЭВМ

Оценка долговременной безопасности ПГЗ ЖРО выполнялась с использованием геофильтрационных геомиграционных моделей, реализованных в отечественных программах для ЭВМ — «ГЕОПОЛИС» [14], «GeRa» [15] и «НИМФА 4.0» [16].

Прогнозные расчеты выполнены как для сценария нормального (эволюционного) протекания естественных процессов на площадке размещения ПГЗ ЖРО (наиболее вероятного сценария эволюции системы захоронения РАО), так и альтернативных (маловероятных) сценариев. Расчетный срок долговременного прогноза составлял 100 000 лет после закрытия ПГЗ ЖРО.

Результаты расчетов, выполненных с использованием аттестованной программы для ЭВМ «ГЕОПОЛИС» для сценария нормальной

эволюции ПГЗ ЖРО «Железногорский», свидетельствуют о непревышении установленных контрольных уровней радиационного воздействия (далее — УВ) в областях разгрузки эксплуатационных и четвертичного горизонтов в реки Кан, Большая Тель и Енисей для всех радионуклидов. Однако, следует отметить, что максимальное значение удельной активности ^{90}Sr в области разгрузки I эксплуатационного горизонта в реку Большая Тель через 280 лет после закрытия ПГЗ ЖРО может превышать на 30% величину 0,1 УВ.

Максимальное значение дозы облучения составляет $1,4 \cdot 10^{-2}$ мЗв/год и достигается через 280 лет после закрытия ПГЗ ЖРО «Железногорский». После достижения максимального значения годовой эффективной дозы облучения наблюдается быстрый спад, обусловленный распадом дозообразующего радионуклида ^{90}Sr .

Для ПГЗ ЖРО «Северский» расчеты долговременной безопасности системы захоронения РАО, выполненные с использованием аттестованной программы для ЭВМ «НИМФА 4.0», а также программы для ЭВМ «PMWIN», показали допустимый уровень радиационного воздействия ПГЗ ЖРО «Северский» на критическую группу населения. Расчеты также показали, что:

- короткоживущие радионуклиды в концентрациях, превышающих УВ, не выйдут за пределы горного отвода недр, а в течение первых сотен лет произойдет их снижение до величин ниже УВ и непосредственно в эксплуатационных горизонтах;
- время выхода долгоживущих радионуклидов в сферу активной жизнедеятельности человека составит 50 000—100 000 лет, максимальные концентрации долгоживущих радионуклидов в области выхода будут ниже УВ;
- нитраты в концентрациях, превышающих ПДК, не выйдут за пределы горного отвода недр (через 700 лет в эксплуатационных горизонтах

концентрация нитратов снизится до величин меньше ПДК);

- минимальное разбавление условно нейтрального (не взаимодействующего с вмещающими породами и не разлагающегося) компонента на момент его выхода в сферу активной жизнедеятельности человека превысит значения 2 500 раз.

Для ПГЗ ЖРО «Димитровградский» расчеты долговременной безопасности системы захоронения РАО выполнены с использованием аттестованной программы для ЭВМ «GeRa».

В рамках сценария нормальной эволюции ПГЗ ЖРО «Димитровградский» не прогнозируется радиационное воздействие ПГЗ ЖРО на население ввиду большой глубины залегания эксплуатационных горизонтов (1120—1514 м).

Геомиграционные расчеты указывают на продолжение тенденций дифференцированного распространения компонентов ЖРО в III и IV зонах. По причине высокого градиента скорость движения для III зоны будет выше, что обуславливает выход компонентов ЖРО (^{137}Cs , ^{90}Sr) за пределы горного отвода уже к 2031 году в восточном направлении в концентрациях, превышающих УВ. α -излучающие нуклиды (^{241}Am , ^{238}Pu) в течение всего расчетного срока долговременного прогноза, ввиду их относительно малого количества и высокой сорбции, будут находиться в пределах горного отвода недр, а основное их количество будет сосредоточено вблизи нагнетательных скважин.

Для альтернативных (маловероятных) сценариев эволюции всех ПГЗ ЖРО результаты прогнозных расчетов показали, что допустимые уровни радиационного воздействия не будут превышены.

Исследования эволюции свойств тампонажных материалов

Для подтверждения долговременной стабильности и надежности ИББ, обеспечивающих изоляцию компонентов ЖРО, был выполнен комплекс исследований, включающий в себя изучение физико-механических и физико-химических свойств, изолирующей способности тампонажного (цементного) камня, характера изменений структуры тампонажных материалов в процессе их контакта с пластовыми водами ПГЗ ЖРО и модельными растворами захораниваемых ЖРО, выдержанных при температурах +20 °С, +30 °С и +60 °С.

В качестве исходного материала для проведения исследования использовали тампонажный портландцемент бездобавочный для низких и

нормальных температур (ПЦТ I-G-50), широко применяемый в нефтегазовой промышленности при креплении и ликвидации скважин. Для регулирования реологических, изоляционных свойств и водоотделения в качестве добавки к ПЦТ I-G-50 использовали различное количество бентонитового глинопорошка, применяемого при бурении нефтяных и газовых скважин, тоннельной проходки, а также для строительства сооружений по технологии «стена в грунте», устройства противодиффузионных завес, тиксотропных рубашек и др.

Исследования влияния химической коррозии на структурные параметры компонентов цементного камня выполняли физико-химическими методами, включая определение макро- и микродефектов методом рентгеновской микротомографии. Физико-механические свойства образцов определяли согласно стандартным методам в соответствии с действующими государственными стандартами Российской Федерации. В публикации [17] приведены методы исследования образцов тампонажных материалов и полученные результаты исследования в условиях ПГЗ ЖРО «Железнодорожский».

Экспериментальные исследования проводили в соответствии с «Программой исследований материалов и конструкций для ликвидации скважин, инженерных барьеров безопасности» на базе Научно-исследовательского института строительных материалов и технологий НИУ МГСУ (рис. 3).

По результатам проведенных экспериментальных исследований было подготовлено заключение по эволюции отвердевших тампонажных материалов, выдержанных в подземных водах районов размещения ПГЗ ЖРО и модельных растворах ЖРО, а также был осуществлен выбор наиболее оптимального тампонажного материала для ликвидации скважин ПГЗ ЖРО «Железнодорожский», «Северский» и «Димитровградский».

На основании результатов экспериментальных исследований были разработаны составы с использованием разных видов тампонажных материалов (тампонажных цементов и бентонита) для различных условий ПГЗ ЖРО, а также были проведены исследования их технологических характеристик (плотность раствора, водоотделение, растекаемость и т. п.) и физико-механических свойств в условиях нормальных и повышенных температур. Для понимания эволюции тампонажных материалов были выполнены исследования фазового состава цементного камня с использованием рентгеновской дифрактометрии, а также макро- и микродефектов в структуре цементного камня методом



Рис. 3. Определение физико-механических свойств образцов тампонажных материалов

рентгеновской микротомографии. Определение степени коррозии поверхностного слоя цементного камня осуществляли с использованием растрового электронного микроскопа, оснащенного рентгеновским спектрометром для проведения элементного микроанализа.

По результатам исследований был выполнен анализ эволюции затвердевших тампонажных материалов в условиях воздействия, на основании прогноза вероятной глубины разрушения на период до 100 лет.

Основываясь на результатах экспериментальных исследований, учитывая характеристики геологической среды и состав ЖРО, в качестве тампонажных материалов, устойчивых к деградации в условиях ПГЗ ЖРО, были предложены следующие составы:

- для скважин ПГЗ ЖРО «Железногорский» и «Северский» — ПЦТ I-G-50 (В/Ц=0,42) и бентонито-цементный состав с содержанием бентонита 10% (В/Ц=0,66);
- для скважин ПГЗ ЖРО «Димитровградский» — ПЦТ I-G-50 СС-1 (В/Ц=0,42).

Прогнозная глубина разрушения образцов на период до 100 лет по результатам оценки составила от 0,004 до 0,073 см.

Разработка положений по закрытию ПГЗ ЖРО

В рамках реализации Программы были разработаны концептуальные положения по закрытию ПГЗ ЖРО, которые направлены на приведение ПГЗ ЖРО в конечное состояние, обеспечивающее безопасность населения и окружающей среды в течение периода сохранения потенциальной опасности захороненных ЖРО.

Достижение конечного состояния осуществляется посредством вывода из эксплуатации поверхностных сооружений (зданий, сооружений, емкостей, трубопроводов, оборудования и др.) и ликвидации большей части подземных сооружений (скважин), за исключением скважин, предназначенных для выполнения долговременного мониторинга.

С использованием результатов проведенных исследований разработаны концептуальные положения к обоснованию решений по безопасному закрытию ПГЗ ЖРО и система организационно-технических мер для обеспечения поэтапного безопасного закрытия ПГЗ ЖРО. В соответствии с разработанной системой организационно-технических мер, безопасное поэтапное закрытие ПГЗ ЖРО обеспечивается реализацией следующих мероприятий (рис. 4) [10], [18]:

- применение технических решений по ликвидации (тампонированию) эксплуатационных скважин, разработанных с учетом текущего технического состояния конкретной скважины, состояния эксплуатационного горизонта, содержащего компоненты РАО, и вышележащих горизонтов на участках размещения скважин;
- вывод из эксплуатации объектов (зданий, сооружений, емкостей, трубопроводов, оборудования и др.) наземной инфраструктуры, за исключением объектов, необходимых для проведения мониторинга системы захоронения РАО и обеспечения физической защиты;
- обоснование дальнейшего безопасного использования наблюдательных скважин для целей мониторинга за состоянием системы захоронения РАО;

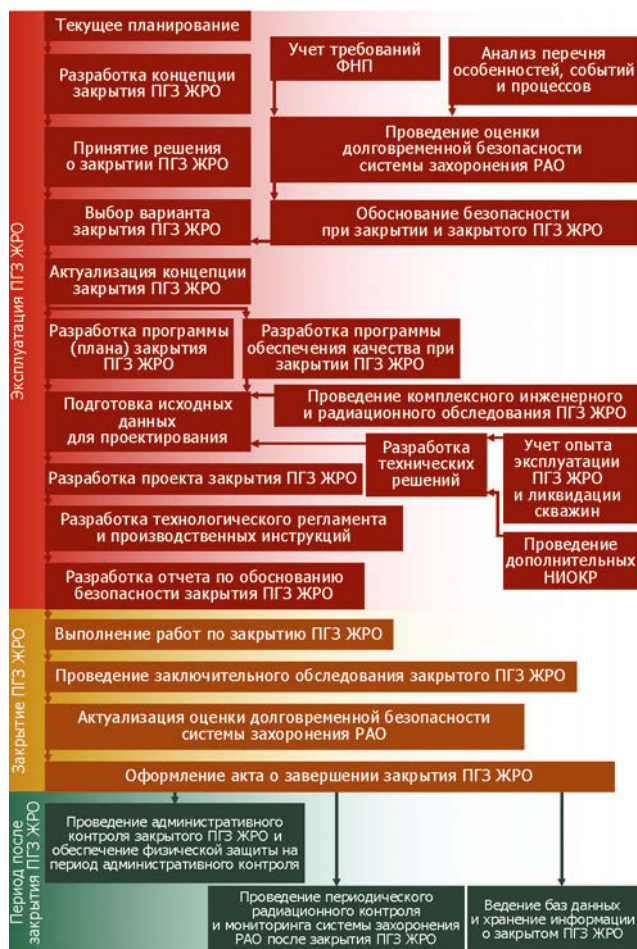


Рис. 4. Общая схема мероприятий, связанных с закрытием ПГЗ ЖРО

- анализ результатов выполненных работ после завершения каждого этапа закрытия ПГЗ ЖРО, в том числе дополнительного обследования ПГЗ ЖРО в объеме, необходимом для своевременной корректировки проектной документации и принятием необходимых мер по безопасному выполнению работ на последующих этапах закрытия ПГЗ ЖРО;
- проведение при закрытии ПГЗ ЖРО и после его закрытия мониторинга системы захоронения РАО, с целью контроля за поведением компонентов РАО;
- проведение контроля радиационной обстановки на территории ПГЗ ЖРО после его закрытия, организация и проведение радиационного контроля персонала, задействованного на этапах закрытия ПГЗ ЖРО;
- подтверждение конечного состояния закрытия ПГЗ ЖРО, установленного в проектной документации, результатами заключительного обследования закрытого ПГЗ ЖРО и оформление необходимой документации на закрытый ПГЗ ЖРО в соответствии с действующими нормативными документами.

Разработанная система организационно-технических мер закрытия ПГЗ ЖРО может быть использована при планировании закрытия и обеспечении безопасности при реализации мероприятий по закрытию ПГЗ ЖРО.

Основные результаты

В результате реализации отдельных мероприятий, предусмотренных Программой для всех ПГЗ ЖРО, эксплуатируемых ФГУП «НО РАО», были получены следующие результаты:

- собрана, систематизирована и проанализирована существующая информация об условиях размещения и эксплуатации ПГЗ ЖРО;
- оценена значимость физико-химических (в том числе коллоидного транспорта радионуклидов), микробиологических и других процессов, протекающих в системе захоронения РАО, для обоснования безопасности;
- разработана концепция закрытия ПГЗ ЖРО, с учетом исследований свойств тампонажных материалов и их эволюционной деградации, сроков сохранения изолирующих свойств барьеров безопасности;
- разработаны концептуальные и математические модели ПГЗ ЖРО с учетом протекающих в них процессов, которые реализованы с использованием аттестованных программ для ЭВМ;
- выполнена оценка долговременной безопасности ПГЗ ЖРО;
- разработаны и обоснованы сценарии эволюции системы захоронения РАО с учетом климатической эволюции районов размещения ПГЗ ЖРО, а также изменений геологической среды в период эксплуатации и после ее завершения.

Планомерное выполнение мероприятий Программы позволило реализовать рекомендации группы экспертов МАГАТЭ, а также определить направления совершенствования обоснования безопасности на этапах эксплуатации и закрытия ПГЗ ЖРО.

Заключение

Вместо заключения авторам хочется почтить память Андрея Ивановича Рыбальченко, которого не стало 11 сентября 2022 года.

Всю свою профессиональную жизнь (да и личную тоже) Андрей Иванович, проработав в атомном институте (ВНИПИпромтехнологии), посвятил реализации уникального метода размещения жидких промышленных и радиоактивных отходов в глубокозалегающие, изолированные от поверхности земли, пласты-коллекторы и

обеспечения безопасности глубинного захоронения отходов. Андрей Иванович вел активную научную деятельность: защитил кандидатскую диссертацию, опубликовал множество статей и материалов в научных журналах, внедрил несколько собственных изобретений. В 1994 году Андрей Иванович совместно с коллективом авторов подготовил и издал книгу «Глубинное захоронение жидких отходов», хорошо известную широкому кругу специалистов не только в России, но и за рубежом.

В 2013—2021 годах, знания, навыки, усердие и профессионализм Андрея Ивановича сыграли большую роль в ходе детального изучения зарубежными экспертами технологии захоронения ЖРО, и при анализе накопленного многолетнего опыта и оценке безопасности применения такой технологии в Российской Федерации, а также в получении представленных в настоящей статье результатов.

Своими эрудицией, высокой квалификацией, добросовестностью и трудолюбием, высказыванием новых идей и воплощением их в жизни он приобрел огромное уважение как среди коллег, так и оппонентов. Обладая огромным опытом, энергичностью и любовью к своему делу, Андрей Иванович успешно отстаивал реальность и безопасность технологии глубинного захоронения ЖРО и охотно делился своими знаниями с молодыми учеными и специалистами.

Литература

1. Линге И. И., Уткин С. С., Хамаза А. А., Шарфутдинов Р. Б. Опыт применения международных требований по обоснованию долговременной безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов: проблемы и уроки // *Атомная энергия*. 2016. Т. 120. № 4. С. 208—213.
2. Международное агентство по атомной энергии. Захоронение радиоактивных отходов, № SSR-5. Конкретные требования по безопасности. МАГАТЭ, Вена, 2011.
3. International Peer Review of the Deep Well Injection Practice for Liquid Radioactive Waste in the Russian Federation. Final Report of the IAEA International Review Team July 2013. IAEA, Vienna, 2020. — URL: <https://www.iaea.org/publications>.
4. Дорофеев А. Н., Савельева Е. А., Уткин С. С., Понизов А. В. и др. Эволюция обоснования долговременной безопасности ПГЗ ЖРО // *Радиоактивные отходы*. 2017. № 1. С. 54—63.
5. Шарфутдинов Р. Б., Понизов А. В., Мурлис Д. В., Савельева Е. А. и др. Методические аспекты учета особенностей, событий и процессов природного и техногенного происхождения при обосновании

долговременной безопасности системы захоронения РАО // *Ядерная и радиационная безопасность*. 2018. № 4 (90). С. 20—33.

6. Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste. An International Database. Nuclear Energy Agency. Organisation for Economic Co-operation and Development, 2000.

7. International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, Version 3.0. Nuclear Energy Agency. Organisation for Economic Co-operation and Development. August 2019.

8. НП-055-14. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности.

9. НП-064-17. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии.

10. Понизов А. В. Комплексный подход к обоснованию решений по закрытию пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов : дисс.... канд. техн. наук. — Москва, 2022. 173 с.

11. Болдырева Д. А., Василюшин А. Л., Понизов А. В., Фелицын М. А. и др. Оценка климатической эволюции в районах размещения пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов для обоснования долговременной безопасности // *Ядерная и радиационная безопасность*. 2019. № 3 (93). С. 36—46.
12. Ponzov A., Boldyreva D., Vasilishin A., Felitsyn M. The results of the forecast of climate evolution scenarios to be taken into account when assessing the long-term safety of the deep disposal facilities for liquid radioactive waste in the Russian Federation / *Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe, Portoroz, Slovenia*, 2018.

13. Понизов А. В., Верецагин П. М., Байдарико Е. А. и др. Условия, последствия и пути предотвращения заколонных перетоков жидкостей по стволам скважин на участках глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2019. № 2. С. 56—67.

14. Аттестационный паспорт программы для ЭВМ «ГЕОПОЛИС» № 458 от 26 декабря 2018 года. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору.

15. Аттестационный паспорт программного средства «Программа для трехмерного геофильтрационного и геомиграционного моделирования» (GeRa/V1) № 443 от 17 апреля 2018 г. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору.

16. Аттестационный паспорт программного средства «НИМФА 4.0» № 419 от 15 июня 2018 года. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору.

17. Понизов А. В., Пустовгар А. П., Дорофеев А. Н., Верещагин П. М. и др. Исследование характеристик тампонажных материалов для ликвидации скважин пункта глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов «Железногорский» // Радиоактивные отходы. 2021. № 2 (15). С. 63–72.
18. Понизов А. В. Система организационно-технических мер по обеспечению безопасного закрытия пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов. Концептуальные положения // Ядерная и радиационная безопасность. 2020. № 4 (98). С. 47–60.

Информация об авторах

Дорофеев Александр Николаевич, кандидат технических наук, руководитель Проектного офиса, Госкорпорация «Росатом» (119017, Москва, ул. Большая Ордынка, д. 24), e-mail: ANDorofeev@rosatom.ru.

Понизов Антон Владимирович, начальник отдела, ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5), e-mail: ponizov@secnrs.ru.

Рыбальченко Андрей Иванович, кандидат геолого-минералогических наук.

Захарова Елена Васильевна, кандидат химических наук, заведующая лабораторией, Институт физической химии и электрохимии им А Н Фрумкина РАН (119071, Москва, Ленинский пр-т, д. 31, корп. 4), e-mail: zakharova@ipc.rssi.ru.

Зубков Андрей Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, начальник лаборатории геотехнологического мониторинга, Акционерное общество «Сибирский химический комбинат» (636039, Томская область, Северск, ул. Курчатова, д. 1), e-mail: SHK@seversk.tomsknet.ru.

Верещагин Павел Михайлович, кандидат технических наук, заместитель начальника отдела, ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5), e-mail: vereschagin@secnrs.ru.

Василишин Александр Леонидович, начальник лаборатории, ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5), e-mail: vasilishin@secnrs.ru.

Мурлис Денис Витальевич, старший научный сотрудник, ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5), e-mail: murlis@secnrs.ru.

Шарафутдинов Рашет Борисович, кандидат технических наук, заместитель директора, ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5), e-mail: charafoutdinov@secnrs.ru.

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

Сускин Виктор Викторович, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: viksus@ibrae.ac.ru.

Библиографическое описание статьи

Дорофеев А. Н., Понизов А. В., Рыбальченко А. И., Захарова Е. В., Зубков А. А., Верещагин П. М., Василишин А. Л., Мурлис Д. В., Шарафутдинов Р. Б., Савельева Е. А., Сускин В. В. Результаты расчетно-экспериментальных исследований для обоснования долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения ЖРО // Радиоактивные отходы. 2022. № 4 (21). С. 24–38. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-4-24-38.

RESULTS OF COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL STUDIES ON THE LONG-TERM SAFETY JUSTIFICATION OF DEEP DISPOSAL FACILITIES FOR LRW

Dorofeev A. N.², Ponizov A. V.¹, Rybalchenko A. I., Zakcharova E. V.³, Zubkov A. A.⁴,
Vereshchagin P. M.¹, Vasilishin A. L.¹, Murlis D. V.¹, Sharafutdinov R. B.¹,
Saveleva E. A.⁵, Suskin V. V.⁵

¹Federal State-Funded Institution Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia

²State Corporation Rosatom, Moscow, Russia

³Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁴Joint stock company "Siberian Chemical Combine", Seversk, Tomsk Region, Russia

⁵Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received on October 20, 2022

The article overviews the findings of individual studies under the Program of Calculation and Experimental Research Seeking to Demonstrate and Assess the Long-term Safety of Deep Disposal Facilities for Liquid Radioactive Waste Aiming to Implement the Recommendations of the IAEA Peer Review of the Deep Well Injection Practice for Liquid Radioactive Waste in the Russian Federation. To demonstrate the long-term safety of the Zheleznogorsk, Seversk and Dimitrovgrad deep disposal facilities for liquid radioactive waste (hereinafter referred to as the DDF LRW), data on the geological and hydrogeological conditions in the regions and at the DDF LRW sites were collected and systematized; the processes occurring in DDF LRW near and far zones, including those involved in radioactive waste (RW) component transport, were studied; evolution scenarios for the RW disposal system were developed, including a forecast describing potential climate changes in the DDF LRW areas covering a period of up to 100,000 years; conceptual and mathematical DDF LRW models were developed; computer software was used in predictive calculations focused on the migration of liquid RW components in the operational DDF LRW horizons with the potential radiation impact on the population been assessed. The study also involved some computational and experimental research focused on the evolution of backfill materials to develop the designs of some additional engineered safety barriers to be installed during DDF LRW DGR well abandonment; the paper also presents the approaches to the development of the DDF LRW closure concept.

Keywords: radioactive waste, liquid radioactive waste, deep disposal facility for liquid radioactive waste, safety assessment.

References

1. Linge I. I., Utkin S. S., Khamaza A. A., Sharafutdinov R. B. Opyt primeneniya mezhdunarodnykh trebovaniy po obosnovaniyu dolgovremennoy bezopasnosti punktov zakhroneniya radioaktivnykh otkhodov: problemy i uroki [Experience in Applying the International Requirements for the Validation of Long-Time Safety of Radwaste Disposal Sites: Problems and Lessons]. *Atomnaya energiya — Atomic Energy*, 2016, vol. 120, no. 4, pp. 208—213.
2. International Atomic Energy Agency. *Disposal of Radioactive Waste*, No. SSR-5. Specific Safety Requirements. IAEA, Vienna, 2011.
3. *International Peer Review of the Deep Well Injection Practice for Liquid Radioactive Waste in the Russian Federation*. Final Report of the IAEA International Review Team July 2013. IAEA, Vienna, 2020.
4. Dorofeev A. N., Saveleva E. A., Utkin S. S., Ponizov A. V. et al. Ehvolyutsiya obosnovaniya dolgovremennoi bezopasnosti PGZ ZHRO [Evolution in the Safety Case for Liquid Radioactive Waste Geological Repositories]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2017, no. 1, pp. 54—63.
5. Sharafutdinov R. B., Ponizov A. V., Murlis D. V., Saveleva Ye. A. et al. Metodicheskiye aspekty ucheta osobennostey, sobytiy i protsessov prirodno i tekhnogennogo proiskhozhdeniya pri obosnovanii dolgovremennoy bezopasnosti sistemy zakhroneniya RAO [Methodological aspects of taking into account the features, events and processes of natural and man-made origin in the long-term safety assessment of a RW disposal system]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' — Nuclear and Radiation Safety*, 2018, no. 4 (90), pp. 20—33.
6. *Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste*. An International Database. Nuclear Energy Agency. Organisation for Economic Co-operation and Development, 2000.
7. *International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste*, Version 3.0. Nuclear Energy Agency. Organisation for Economic Co-operation and Development. August 2019.

8. NP-055-14. *Zakhoroneniye radioaktivnykh otkhodov. Printsipy, kriterii i osnovnyye trebovaniya bezopasnosti* [Disposal of Radioactive Waste. Principles, criteria and Basic Safety Requirements].
9. NP-064-17. *Uchet vneshnikh vozdeystviy prirodnogo i tekhnogenogo proiskhozhdeniya na ob'yekty ispol'zovaniya atomnoy energii* [Accounting for External Impacts of Natural and Man-made Origin on Nuclear Facilities]
10. Ponizov A. V. *Kompleksnyy podkhod k obosnovaniyu resheniy po zakrytiyu punktov glubinnogo zakhoroneniya zhidkikh radioaktivnykh otkhodov* [An integrated approach demonstrating the rationale of closure methods proposed for deep LRW disposal facilities]: diss. kand. tekhn. Science. Moscow, 2022. 173 p.
11. Boldyreva D. A., Vasilishin A. L., Ponizov A. V., Felitsyn M. A. et al. Otsenka klimaticheskoy evolyutsii v rayonakh razmeshcheniya punktov glubinnogo zakhoroneniya zhidkikh radioaktivnykh otkhodov dlya obosnovaniya dolgovremennoy bezopasnosti [Assessment of climatic evolution in the siting areas of deep LRW disposal facilities seeking to assess their long-term safety]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' — Nuclear and Radiation Safety*, 2019, no. 3 (93), pp. 36–46.
12. Ponizov A., Boldyreva D., Vasilishin A., Felitsyn M. The results of the forecast of climate evolution scenarios to be taken into account when assessing the long-term safety of the deep disposal facilities for liquid radioactive waste in the Russian Federation / Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe, Portorozh, Slovenia, 2018.
13. Ponizov A. V., Vereshchagin P. M., Baidariko E. A. et al. Usloviya, posledstviya i puti predotvrashcheniya zakolonykh peretokov zhidkostey po stvolam skvazhin na uchastkakh glubinnogo zakhoroneniya zhidkikh radioaktivnykh otkhodov [Conditions, consequences and ways to prevent behind-the-casing liquid flows through wellbores in deep LRW disposal areas]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya — Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 2019, no. 2, pp. 56–67.
14. Certification passport for the GEOPOLIS computer software No. 458 of December 26, 2018. Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision.
15. Certification passport for the software tool designed for three-dimensional geofiltration and geomigration modeling (GeRa/V1) No. 443 of April 17, 2018. Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision.
16. Certification passport for the NIMFA 4.0 software tool No. 419 of June 15, 2018. Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision.
17. Ponizov A. V., Pustovgar A. P., Dorofeev A. N., Vereshchagin P. M., Sokolov I. P. Issledovanie kharakteristik tamponazhnykh materialov dlya likvidatsii skvazhin punkta glubinnogo zakhoroneniya zhidkikh radioaktivnykh otkhodov "Zheleznogorskiy" [Exploring the Characteristics of Backfill Materials Proposed for Well Decommissioning Purposes at the Site of Zheleznogorsk Liquid Radioactive Waste Deep Disposal Facility]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2021, no. 2 (15), pp. 63–72. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-1-63-72.
18. Ponizov A. V. Sistema organizatsionno-tekhnicheskikh mer po obespecheniyu bezopasnogo zakrytiya punktov glubinnogo zakhoroneniya zhidkikh radioaktivnykh otkhodov. Kontseptual'nyye polozheniya [System of organizational and technical measures providing safe closure of deep LRW disposal facilities. Conceptual provisions]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' — Nuclear and Radiation Safety*, 2020, no. 4 (98), pp. 47–60.

Information about the authors

Dorofeev Aleksandr Nikolaevich, PhD, Head of the Project Office, State Corporation Rosatom (24, Bolshaya Ordynka st., Moscow, 119017, Russia), e-mail: ANDorofeev@rosatom.ru.

Ponizov Anton Vladimirovich, head of office, Federal State-Funded Institution Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya st., Moscow, 107140, Russia), e-mail: ponizov@secnrs.ru.

Rybalchenko Andrey Ivanovich, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences.

Zakharova Elena Vasil'evna, PhD, Head of the Laboratory, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences (31, bld. 4, Leninsky prospect, Moscow, 119071, Russia), e-mail: zakharova@ipc.rssi.ru.

Zubkov Andrey Aleksandrovich, PhD, Head of laboratory, Joint stock company “Siberian Chemical Combine” (1, Kurchatov st., Seversk, Tomsk Region, 636039, Russia), e-mail: SHK@seversk.tomsknet.ru.

Vereshchagin Pavel Mikhailovich, PhD, Deputy Head of Department, Federal State-Funded Institution Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya st., Moscow, 107140, Russia), e-mail: vereschagin@secnrs.ru.

Vasilishin Aleksandr Leonidovich, head of laboratory, Federal State-Funded Institution Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya st., Moscow, 107140, Russia), e-mail: vasilishin@secnrs.ru.

Murlis Denis Vitalievich, senior researcher, Federal State-Funded Institution Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya st., Moscow, 107140), e-mail: murlis@secnrs.ru.

Sharafutdinov Rashed Borisovich, PhD, Deputy Director, Federal State-Funded Institution Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya st., Moscow, 107140, Russia), e-mail: charafoutdinov@secnrs.ru.

Saveleva Elena Aleksandrovna, PhD, Senior researcher, Head of laboratory, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulsкая st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: esav@ibrae.ac.ru.

Suskin Viktor Viktorovich, PhD, Junior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulsкая, Moscow, 115191, Russia), e-mail: viksus@ibrae.ac.ru.

Bibliographic description

Dorofeev A. N., Ponizov A. V., Rybalchenko A. I., Zakcharova E. V., Zubkov A. A., Vereshchagin P. M., Vasilishin A. L., Murlis D. V., Sharafutdinov R. B., Saveleva E. A., Suskin V. V. Results of Computational and Experimental Studies on the Long-Term Safety Justification of Deep Disposal Facilities for LRW. *Radioactive Waste*, 2022, no. 4 (21), pp. 24–38. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-4-24-38. (In Russian).