

ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ХРАНИЛИЩ ВАО И ОЯТ: МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ В ПРИЛОЖЕНИИ К ЕНИСЕЙСКОМУ ПРОЕКТУ

Б. Т. Кочкин

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

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 05 марта 2018 г.

Статья суммирует результаты работы интернациональных экспертных групп, касавшихся общих проблем безопасности геологической изоляции ВАО и ОЯТ. В ней представлены основные рекомендации, относящиеся к методологии, процедурам, терминологии и нормативным требованиям по оценке безопасности, а также рассмотрены возможности применения этих рекомендаций при реализации Енисейского проекта.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, геологическое хранилище, оценка безопасности.

Введение

Декларация о сооружении объекта окончательной изоляции долгоживущих РАО (ВАО и САО 1-го и 2-го классов) в Нижнеканском гранитоидном кристаллическом массиве (Красноярский край, Енисейский кряж, окрестности г. Железногорска) была принята в 2008 г. [1]. К сегодняшнему дню выбрана площадка, представлен проект сооружения, намечена стратегия реализации жизненного цикла объекта [2] и принципиально решен вопрос о строительстве подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) на месте будущего объекта [3]. Успешная реализация этих планов во многом зависит от комплексного решения проблемы обоснования безопасности будущего объекта. Это решение регулируется нормативными документами разного уровня, которые устанавливают определенные требования к безопасности объекта.

В середине 1980-х гг. считалось, что решены все основные технические проблемы обеспечения безопасной изоляции ВАО и ОЯТ от биосферы по мультибарьерной технологии в могильниках шахтной конструкции [4]. Человечество давно научилось строить шахты. Мультибарьерная технология, предлагавшаяся в разных

вариантах, казалось, гарантировала длительную изоляцию радионуклидов. Тем не менее к началу 1990-х годов уже было признано, что проекты реализации этой технологии столкнулись с проблемой долговременной оценки безопасности [5]. Практически «вечная» опасность ВАО и ОЯТ, с одной стороны, и жесткие нормативные требования безопасности — с другой, обнажили фундаментальные научные проблемы, касающиеся достоверности оценки безопасности на длительную перспективу. О сложности этих проблем говорит тот факт, что до сих пор не реализован ни один подобный проект в мире [6]. Сравнительно позднее начало практической реализации проекта геологической изоляции ВАО в Российской Федерации позволяет использовать международный опыт, приобретенный в области оценки безопасности аналогичных зарубежных проектов. В статье, в частности, представлен обзор движения международного экспертного сообщества по пути решения этих проблем. В свою очередь, реализация Енисейского проекта, имеющего свои специфические черты, послужит источником нового опыта для мирового сообщества [7].

РАО и обращение с ними

Радиоактивные отходы появились вместе с началом промышленного освоения атомной энергии как в военных, так и в мирных целях. С тех пор количество РАО начало стремительно расти. Наибольшую опасность представляет хранение на поверхности отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и продуктов его переработки — долгоживущих ВАО и САО. Их общий объем не превышает долей процента от объема всех РАО, однако высокая радиоактивность, аварийные утечки и необходимость длительной изоляции от среды обитания заставляют взять курс на их геологическое захоронение. Эта технология, как признано мировым экспертным сообществом, дает приемлемое в техническом и экономическом отношении решение проблемы, минимизирует радиационную опасность для населения, исключает вероятность намеренного хищения радиоактивных материалов и, главное, снимает бремя накопленных отходов с будущих поколений [8, 9].

Традиционная технология обращения с РАО, которая подразумевает их хранение в условиях герметичной изоляции от среды обитания, сопряжена с опасностью всевозможных аварий и утечек радиоактивности. Захоронение, как альтернатива герметичному хранению, подразумевает нормированное (регулируемое) поступление радионуклидов в окружающую среду из подземного сооружения. Подземное сооружение, используемое для подобного размещения РАО, не получило устоявшегося определения. В англоязычной литературе обычно используются термины «repository, installation, facility, plant», которые переводятся на русский язык, соответственно, «хранилище, установка, сооружение, завод». В русскоязычной литературе используются термины «пункт геологического захоронения», «объект окончательной изоляции», «пункт хранения» или просто «могильник». Термин «могильник» наиболее всего отвечает существу технологии, но у него нет англоязычного эквивалента.

Опыт 1960–1970-х гг. показал, что существует несколько способов изоляции радионуклидов от окружающей среды при подземном размещении:

- Физическая изоляция РАО от подземных вод. Она осуществляется путем (1) заключения РАО в металлические канистры, (2) размещения канистр в оболочках из слабопроницаемых глинистых материалов и (3) выбором безводных геологических сред для размещения могильника.
- Снижение растворимости радионуклидов в подземных водах. Это возможно путем (1) связывания их в специальных нерастворимых матрицах, (2) выбором для размещения могильника гидрогеохимических условий,

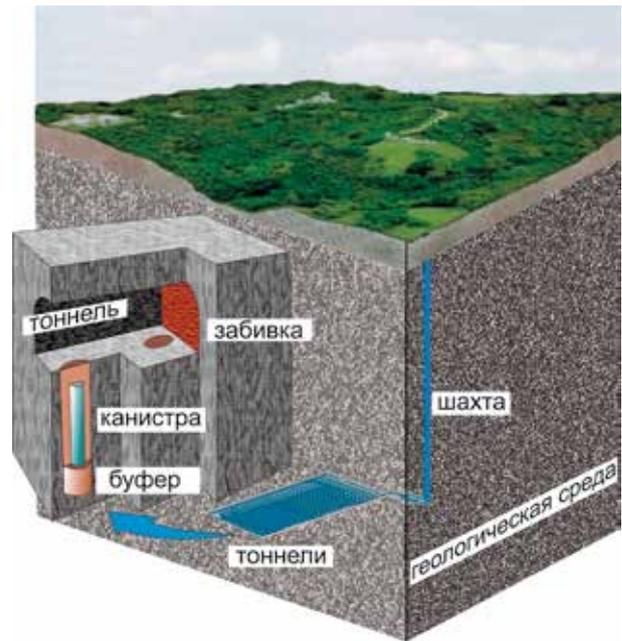


Рис. 1. Схема конструкции мультibarьерного могильника

неблагоприятных для миграции большинства радионуклидов.

- Замедление конвективного переноса радионуклидов подземными водами. Это достигается путем (1) окружения канистр сорбирующими материалами, (2) выбором участков недр с устойчивым водообменом, (3) сложных пород с высокими сорбционными свойствами в отношении радионуклидов.

Эти способы были положены в основу всех проектов мультibarьерных могильников (рис. 1). Все эти способы принято разделять по их функциям на удержание радионуклидов в пределах барьера и замедление миграции тех радионуклидов, которые покинут данный барьер.

Концепция обеспечения безопасности геологических хранилищ основана на использовании различных барьеров в системе захоронения, каждый из которых выполняет свои функции в течение различных периодов времени. Каждая функция обеспечивается свойствами материалов, из которых состоит данный барьер¹. Барьеры могут быть искусственными (инженерными) или природными, присущими геологической среде, которая выбрана для размещения могильника. Имеющиеся руководства предписывают желательность выполнения нескольких функций одним и тем же барьером [10, 11].

Понятие безопасности для мультibarьерного могильника отличается от безопасности других (более простых) технических сооружений. Глубокоэшелонированная защита биосферы и населения должна обеспечиваться совокупностью

¹ В англоязычной литературе они называются «safety functions» / «функции безопасности». В отечественной литературе, например, в НП-055-14, часто используется термин «защитные свойства».

всех барьеров так, чтобы безопасность системы изоляции не зависела чрезмерно от какого-либо одного барьера или от выполнения им какой-либо одной функции [11].

В стандартных конструкциях хранилищ в системе инженерных барьеров / engineered barrier system (СИБ / EBS) предусматриваются следующие: матрица с ВАО, металлическая канистра для матрицы, глинистый буфер между канистрой и вмещающей породой, забивка магистральных тоннелей и других подземных выработок, вмещающая геологическая среда (рис. 1). При этом конкретный проект может иметь собственную компоновку СИБ. Альтернативность в исполнении проектов достигается также путем распределения «ответственности» за обеспечение долгосрочной безопасности между элементами СИБ и условиями в геологической среде. Недостатки геологической среды могут быть компенсированы более совершенными инженерными барьерами.

Оценка безопасности геологического могильника: проблемы и эволюция подходов

Реализация технологии геологического захоронения — комплексная проблема:

- предполагалось, что есть техническое решение обеспечения безопасности, достижимое на уровне современных технологий. Именно таким техническим решением стало предложение удалять отвержденные РАО в глубокие геологические формации или просто — «геологическое захоронение».
- предполагалось, что реализацию этого технического решения можно обеспечить выполнением соответствующих экспериментальных, прикладных и фундаментальных научных исследований.
- предполагалось, что гарантией безопасности геологического могильника будет соблюдение нормативных требований по безопасности, как это принято при реализации обычных технических проектов.

На практике выяснилось, что именно требования к оценке безопасности порождают ряд фундаментальных научных проблем, разрешение которых оказалось невозможным без допущений, сомнительных с точки зрения подходов, принятых в строительстве, в том числе в атомной энергетике. Именно эти сомнения тормозят доведение сегодняшних зарубежных проектов до логического завершения. Очевидно, что успешная реализация Енисейского проекта также будет зависеть от преодоления этих сомнений.

Безопасность геологических хранилищ регламентируется на международном и национальном уровнях. Как бы ни были хороши «защитные функции» геологической среды или отдельных инженерных барьеров, для оценки

безопасности мультибарьерной конструкции требовался интегральный показатель безопасности всей системы изоляции. Из-за того, что абсолютная изоляция радионуклидов от биосферы в течение периода их потенциальной опасности не ожидается по определению, в качестве индикаторов безопасности захоронения стали рассматриваться возможные радиологические последствия размещения могильника в конкретном месте. Ими стали эффективная доза и радиологический риск — показатели безопасности, принятые в атомной промышленности. Такие же индикаторы установлены в российских документах по захоронению РАО [12].

Доказательство соответствия могильника установленным критериям безопасности составляет существо специальной процедуры, получившей название «оценка безопасности» / «safety assessment» (ОБ / SA). Эта процедура призвана контролировать качество всей системы изоляции, которая представляет собой совокупность инженерных барьеров и геологической среды, совместно препятствующих поступлению радионуклидов в биосферу.

В обычной практике для контроля рассеивания загрязнения под землей применяются методы измерения в наблюдательных скважинах, окружающих опасный подземный объект. В случае геологического могильника полномасштабные натурные испытания технически невозможны, прежде всего, из-за пространственно-временных параметров могильника. Так, например, в сегодняшнем Енисейском проекте площадь подземной части могильника превышает 0,2 км² при вертикальном размахе — около 75 м. На глубине около 0,5 км будут размещены до 200 000 м³ отвержденных ВАО и САО классов 1 и 2, окруженных эшелонированной СИБ. Период потенциальной опасности долгоживущих РАО измеряется миллионами лет. Если разместить под землей отдельные тестовые образцы таких РАО или их нерадиоактивных аналогов, неприемлемой окажется сама продолжительность испытаний. Потребуется сотни лет только на то, чтобы инженерные барьеры деградировали и загрязнители вышли в геологическую среду. Только тогда можно будет выполнить контрольные измерения в скважинах. В то же время размещение РАО без каких-либо испытаний недопустимо по соображениям безопасности.

Единственный разумный выход из этой ситуации — это математическое моделирование системы и прогноз поступления радионуклидов в биосферу на основании величин и параметров, определенных в лабораторных условиях, включая эксперименты в ПИЛ. Прогноз должен показать где, когда, какие и сколько радионуклидов попадет в окружающую среду. Данные прогноза послужат основанием для расчета эффективной дозы облучения и

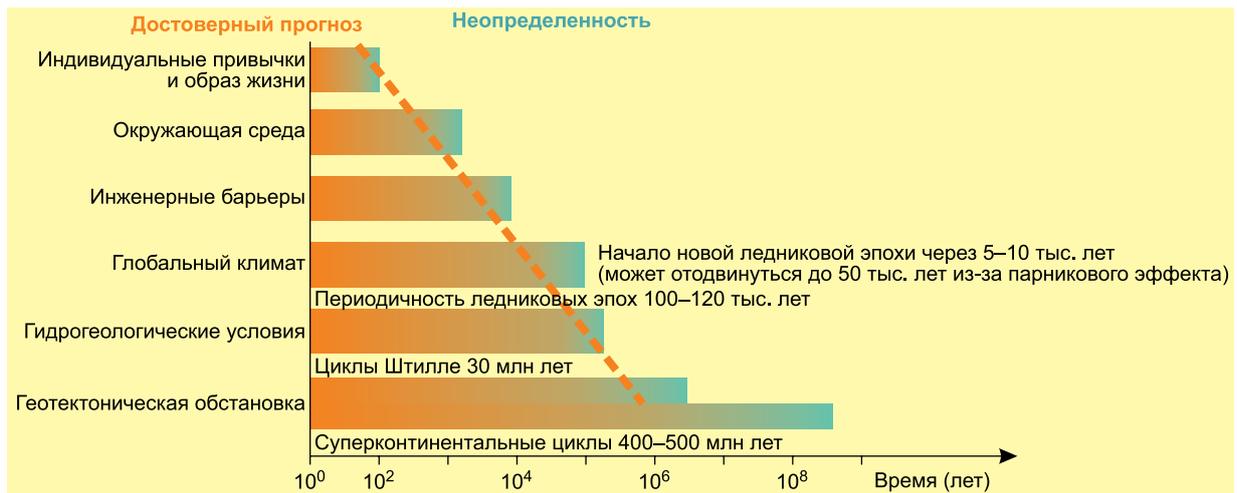


Рис. 2. Горизонты предсказуемости процессов, влияющих на оценку безопасности систем захоронения [40]

рисков для будущих поколений. Прогнозный расчет последствий должен продемонстрировать, что установленные нормы граничных доз и риска (критерии) для населения и окружающей среды не будут превышены за весь период потенциальной опасности долгоживущих ВАО и САО. В международных и национальных нормативных документах этот подход был закреплен. Определено, что выполнение ОБ хранилища должно осуществляться путем моделирования системы изоляции и численного прогноза утечек радионуклидов в среду обитания. В соответствии с базовыми принципами оценки безопасности, результаты прогнозных вычислений должны сравниваться с действующими нормами [10, 12].

В связи с тем, что обосновать долговременную безопасность будущего сооружения экспериментальными методами, как это принято в строительстве обычных объектов, невозможно, системный подход при реализации проектов геологического захоронения диктует в качестве приоритетной (конечной) цели не сооружение могильника, а оценку его безопасности. Это можно пояснить с помощью аналогии могильника и скрытого месторождения урана, которое не проявляется на поверхности повышенными потоками радиоактивности. Шахту для разработки такого месторождения сооружают, когда оно уже открыто. Напротив, шахтное сооружение для захоронения нужно строить так, чтобы радиоактивность, размещенная под землей, никогда бы не обнаружила себя в будущем величинами выше естественного радиоактивного фона. Отсюда и рекомендации поэтапно выполнять оценку безопасности: прежде чем переходить к следующему этапу реализации проекта, необходимо доказывать безопасность на уровне уже выполненных работ. Сейчас же при реализации Енисейского проекта чрезмерно большое внимание уделяется детальному проектированию шахтного сооружения и его эксплуатации, хотя

ранние оценки безопасности могут показать необходимость изменения предлагаемых проектных решений.

Сильнейшее влияние на прогнозное моделирование оказывает исключительно продолжительный период времени, на который необходимо доказать безопасность могильника. По мере увеличения периода численного прогноза ожидается изменение факторов, влияющих на процессы водного рассеивания радиоактивных загрязнителей по пути из могильника в среду обитания. Многие из этих факторов могут быть инициированы редкими и трудно предсказуемыми явлениями естественной и антропогенной природы и внесут неопределенность в результаты моделирования. Отсутствие уверенности в обоснованности вывода о безопасности означает, что задача «снятия бремени накопленных отходов с будущих поколений», которую была призвана решить технология геологического захоронения, обернулась другой стороной. Оказалось, что из-за наличия неопределенностей в долгосрочном прогнозе, будущие поколения вовсе не гарантированы от потенциальной опасности радиационного воздействия могильника. Стало ясно, что придется убедительно показать, что неопределенности в результатах ОБ не оказывают существенного влияния на достоверность прогнозных расчетов [5].

Нелинейные свойства природных объектов обнаружили при исследовании открытых неравновесных систем, каковой, в частности, является геологическая среда. Примерно к 70-м годам прошлого века было доказано, что развитие хаоса в детерминированных системах существенно ограничивает предсказуемость природных и техногенных процессов [14]. Неопределенность в знании исходных данных об условиях в СИБ или о деталях динамических процессов в ней рано или поздно вырастает до огромнейшей неопределенности в прогнозе.

Горизонты достоверного прогноза для процессов, которые необходимо учитывать при расчетах миграции радионуклидов в биосферу, доз и рисков для населения, различаются на порядки (рис. 2). С этим связаны пределы предсказуемости различных процессов, которые определяют общий рост неопределенностей в ОБ. Наиболее предсказуемы геотектонические процессы, а менее всего — процессы в обществе.

Решение проблемы научных неопределенностей в прогнозных расчетах пошло несколькими путями — от совершенствования нормативной базы, касающейся оценки безопасности, до углубленного изучения процессов и факторов водной миграции радионуклидов.

Наверное, первым шагом в этом направлении стало нормативное разделение оценки на два вида: оценку безопасности и оценку надежности² / performance assessment (ОН / РА) [16].

Анализ определений ОБ и ОН, приведенных в разных документах, показал, что если в ОБ оценивается система изоляции в целом, то в ОН оцениваются отдельные изоляционные барьеры. На основе количественных результатов ОБ/ОН определяются перспективы данного проекта изоляции по завершению каждого этапа работ и принимается решение о его продолжении, прекращении или изменении направления работ. ОН становится ОБ, когда анализируется надежность всей системы изоляции. Тогда мерой этой надежности становится уровень радиологического влияния на население. По существу, ОБ — это завершающая или объединяющая стадия ОН, хотя это и не универсальная точка зрения [13]. Поэтапное выполнение ОБ/ОН позволяет частично минимизировать неопределенности в эволюции всей системы.

В конце XX века экспертной группой Агентства по ядерной энергии ОБСЭ (NEA-OECD) была предложена концепция обоснования безопасности геологических хранилищ как средство дальнейшей минимизации неопределенностей [17]. Эта процедура обозначается термином «Post-closure safety case» / «Обоснование безопасности на период после закрытия». Набор материалов, представляемых для этой процедуры, именуют просто «Safety case» / «Досье безопасности» (ДБ).

В некоторых странах ДБ включает стадию операционной безопасности (до закрытия) [13, 18–20]. Концепция ДБ была введена МАГАТЭ как международный стандарт [11, 21]. «Отчет по обоснованию безопасности» (ООБ), составление которого регламентируется российскими нормативными документами [12, 22, 23], можно считать аналогом ДБ.

Согласно стандарту МАГАТЭ, досье безопасности является перечнем аргументов и

доказательств разумного уровня безопасности сооружения. Оно обязательно включает оценку дозы/риска, информацию по достоверности этой оценки и о методах обращения с неопределенностями в ходе ее выполнения, а также доказательства и аргументы, поддерживающие вывод о безопасности. В определении, приводимом в европейских документах, имеется важное уточнение: ДБ — перечень аргументов в поддержку долговременной безопасности хранилища для данной стадии его создания. Они включают сами решения по оценке безопасности и обоснования убежденности в этих решениях, характеризуют все нерешенные проблемы и дают рекомендации по устранению проблем на будущих стадиях создания хранилища [20].

Основу ДБ (или ООБ) составляют три типа оценок: оценка безопасности, оценка надежности и с некоторыми пор оценка функций безопасности / safety function assessment. Последняя процедура была введена в 2006 г. в ходе реализации шведского проекта [24]. Функцию безопасности или защитное свойство³, можно определить как роль, которую играет некая определенная часть системы безопасности в обеспечении безопасности [25]. Главное различие всех этих процедур между собой состоит в используемых индикаторах безопасности и критериях соответствия.

Универсальных схем классификации индикаторов или их формальных определений не существует [25]. Опыт реализации международных проектов, например, SPIN [26] или PAMINA [27], показал, что индикаторы безопасности используются для оценки соответствия установленным нормам могильника в целом. Индикаторы надежности подходят для понимания и оценки поведения отдельных элементов системы. Индикаторы защитных функций / safety function indicators подходят для отдельного рассмотрения и оценки ключевых процессов в системе или ее элементах.

К индикаторам безопасности относятся такие количественные характеристики, как ежегодная эффективная доза или радиологический риск. Кроме дозы или риска в нормативных документах ряда стран используются также «нерисковые» индикаторы безопасности, например, концентрация радиотоксичных элементов в биосферной воде и поток радиотоксичности из геосферы. Необходимость их установления связана с признанием потери смысла в численном расчете доз и рисков на весьма отдаленное будущее [28, 29]. В российских нормативных документах период численного расчета критериев безопасности ничем не ограничен.

Индикаторы надежности позволяют показать работу отдельных ее элементов или совместное функционирование разных барьеров. Можно

² Такой перевод англоязычного термина предложен в работе [15].

³ Возможность перевода английского термина «safety function» как «защитное свойство» была предложена выше.

показать, в каких элементах системы и какие радионуклиды задерживаются и как ее можно оптимизировать. Такие индикаторы могут соответствовать цельным элементам системы (буфер или вмещающие породы) или несколькими ее компонентам (например, канистра, содержащая матрицу, и продукты ее взаимодействия с водой). Измеряются эти индикаторы обычно через концентрации или потоки радионуклидов внутри и между отдельными элементами системы хранилища или другими описательными способами, которые демонстрируют особые свойства системы [30].

Индикаторы защитных функций определены как измеряемые или вычисляемые величины, которые количественно характеризуют определенный объем, к которому относится рассматриваемая защитная функция [24]. Вычисленные значения индикаторов защитных функций характеризуют свойства элементов, относящихся к безопасности отдельно и независимо [26]. Большинство индикаторов защитных функций не зависят от того, поступает или нет поток радионуклидов из «предыдущего» барьера (т. е. от надежности «предыдущего» барьера или компонента). Примерами индикаторов защитных функций, например, для буфера, могут служить: гидравлическая проводимость и давление разбухания, которые определяют способность буфера ограничивать конвективный перенос радионуклидов водой. Такой индикатор, как плотность буфера, показывает способность последнего смягчать смещения пород по трещинам или сокращать микробиологическую активность.

Для количественной оценки безопасности, надежности и функций безопасности необходимо выразить соответствующие индикаторы в измеряемых или вычисляемых величинах и установить критерии. Это не всегда возможно для надежности и функций безопасности.

Критерии безопасности в зарубежных и российских нормативных документах сформулированы в виде численного значения допустимой годовой эффективной дозы облучения и индивидуального радиологического риска. Безопасность системы оценивается на период после загрузки ВАО и ОЯТ в подземное сооружение и перевода его в режим могильника на срок необходимой изоляции, т. е. от момента закрытия до исчезновения реальной опасности размещаемых под землей отходов. Расчет доз и рисков опирается на прогнозные данные поступления радионуклидов в поверхностные воды. Радионуклиды попадают в пищу непосредственно с водой или через пищевые цепочки типа вода — растения — человек или вода — животное — человек и другие. Общее количество попавших в организм радионуклидов формирует индивидуальную дозу, зная которую можно рассчитать риск заболевания раком.

Численные значения критериев безопасности устанавливаются национальными регулирующими органами.

В целях соблюдения установленного предела дозы для населения, хранилище отходов рекомендуется проектировать так, чтобы расчетная доза или риск для населения, которое может подвергнуться облучению в будущем в результате возможных природных процессов, затрагивающих геологическое хранилище, не превышала трети граничной дозы или 0,3 мЗв в год. Ограничение, обусловленное риском смерти от рака, должно быть порядка 10^{-5} в год [11, 12].

В РФ установленная годовая эффективная доза облучения для населения за период жизни (70 лет) — 70 мЗв, т. е. 1 мЗв/год [31]. Из этой величины доля от радиоактивных отходов после их захоронения не должна превышать 0,01 мЗв [32], т. е. заведомо ниже фонового облучения от естественных источников (горные породы, солнечная радиация и др.).

Критерии безопасности, выводимые на основе «нерисковых» индикаторов, могут быть следующими [28]:

- Концентрация радиотоксичности в биосферной воде не должна превышать установленные нормы для питьевой воды.
- Поток радиотоксичности из геосферы (Зв/год) в среду обитания не должен превышать поток естественных радионуклидов в подземных водах района хранилища.

Обращение с неопределенностями

Осознание того факта, что в результатах прогнозных оценок доз и рисков для будущих поколений всегда останутся неопределенности, стало вызовом для научного сообщества и определило содержание исследований на долгие годы. Стало ясно, что придется убедительно показать, что неопределенности в результатах ОБ не оказывают существенного влияния на достоверность прогнозных расчетов [5].

В самом общем виде неопределенность — свойство, характеризующее нечто, точно не установленное, например, «неопределенное положение». По сути дела, за понятием «неопределенность» в скрытом виде присутствует некий субъект, принимающий решение [33].

Вопрос об обращении с неопределенностями при ОБ/ОН геологического захоронения ОЯТ и ВАО был поднят еще в 1980-х гг. [34]. В 1991 г. в документе Агентства по ядерной энергии ОБСЭ признано, что результаты оценки безопасности всегда ассоциированы с неопределенностями [35]. К настоящему времени «обращение с неопределенностями» выделяется в качестве одной из важных процедур при прогнозном моделировании вообще и при подготовке решений по оценке процессов в системе захоронения в частности. Раздел «Обращение с

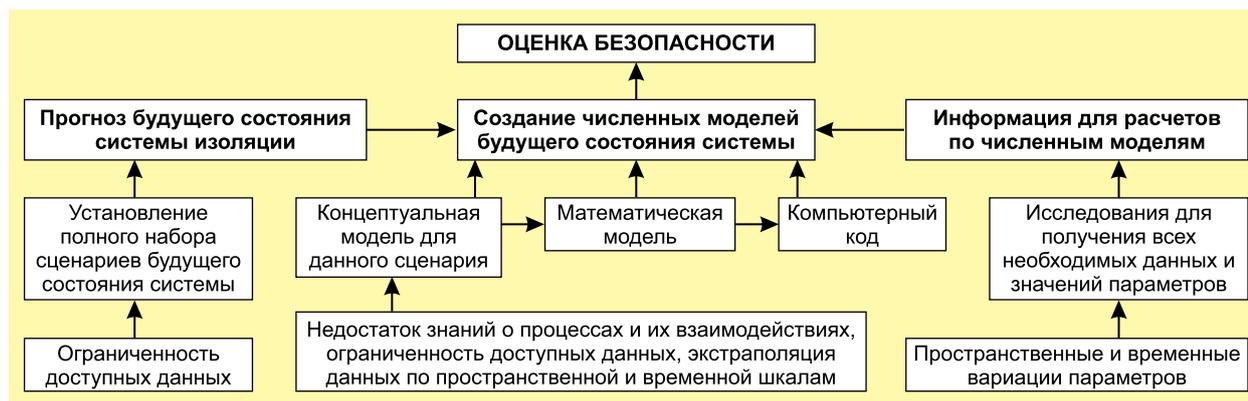


Рис. 3. Источники неопределенностей в оценке безопасности могильника ВАО (составлено по тексту статьи [34])

неопределенностями» есть во всех руководствах по оценке безопасности могильников ОЯТ и ВАО, в том числе российских [23].

В работе [34] было показано, что источники неопределенности многочисленны и вносятся в расчетную модель по трем главным направлениям: из долгосрочного прогноза системы захоронения, из процедуры создания разработки модели и из используемой информации. Каждое из этих направлений, в свою очередь, содержит множество частных процедур, обстоятельств и ситуаций, которые приносят свои неопределенности (рис. 3).

Поскольку различные неопределенности обязательно присутствуют при обосновании безопасности во всяком ДБ (ООб), цель современных исследований по проблемам захоронения — минимизировать пределы остающихся неопределенностей, охватить их количественно, а также разработать стратегию обращения с ними для выработки нормативных решений [13]. Этим проблемам посвящен, например, проект RAMINA (www.ip-ramina.eu).

В международных руководствах неопределенности обычно классифицируются в зависимости от их роли в Об:

- Неопределенности в сценариях связаны со значительными трудно прогнозируемыми изменениями, которые могут проявиться с течением времени в физических процессах, протекающих в СИБ и вмещающей геологической среде.
- Неопределенности в моделях возникают из-за неточностей в понимании поведения природной или инженерной частей системы или частных физических процессов, использования упрощающих представлений в оценочных моделях и в компьютерных кодах.
- Неопределенности в параметрах и данных связаны с неполнотой информации, недоступностью или невозможностью точных измерений [20, 25].

Все три типа неопределенностей связаны между собой и могут обрабатываться разными способами в зависимости от их природы.

Типизация неопределенностей в зависимости от их природы более адекватна с научной точки зрения, поскольку указывает на определенный путь обращения с ними [36, 37].

Неопределенности 1-го рода относятся к выбору значения некоего параметра и могут быть связаны с недостатком знаний о конкретном месте или для описания связей между параметрами в модели объекта. Теоретически они могут быть полностью сняты детальными исследованиями и повторными измерениями, выполняемыми для минимизации погрешностей измерений и повышения точности необходимых параметров. Неопределенности 2-го рода связаны со случайными явлениями. К ним относятся явления естественного (природные катаклизмы) или техногенного (отказы механизмов) характера, а также последствия действий самого человека (аварии по вине человека), вносящие случайную составляющую в измерения и результаты прогноза. Их можно минимизировать, повышая объем выборки, но невозможно устранить окончательно. Неопределенности 3-го рода связаны с событиями, которые случаются через периоды времени несравненно большие, чем опыт человечества, в ситуациях, когда решение не может ждать, пока будут получены строгие экспериментальные данные. В отношении оценки адекватности выбранной для прогноза модели (верна/неверна) вообще не может быть никакой статистики. В таких ситуациях исследователь вынужден оценивать свои выводы и решения как достоверные, исходя только из собственной убежденности в достаточности оснований для этого.

К сожалению, при обосновании долгосрочной безопасности как раз обычны встречи с неопределенностями 3-го рода. Именно обращение с этими неопределенностями вызывает наибольшие проблемы. При обращении с ними используются разные методы: анализ чувствительности моделей, математическая оценка мнений экспертов, качественные суждения экспертов.

Для быстро меняющихся факторов, прогноз которых на продолжительный срок невозможен

в принципе, используются «стилизированные» (упрощающие, но консервативные) предположения [25]. Например, это касается таких процедур, как расчет поглощенной дозы, который зависит от быстро меняющихся факторов окружающей среды и пищевых привычек населения [38]. Для того чтобы обойти неопределенности, связанные с предсказанием образа жизни населения в отдаленном будущем, существующий сегодня образ жизни и действующие нормы безопасности просто переносятся на любой будущий период. Стилизация не исключает такие неопределенности в принципе, но нейтрализует их.

Появление ряда неопределенностей можно просто исключить, если путем нормативного регулирования устранить саму причину их появления. Например, можно установить сравнительно короткий период для численного расчета доз и рисков, а для более отдаленного будущего установить «нерисковые» индикаторы безопасности, прогноз которых потребует учитывать меньшее количество изменчивых факторов [25].

Для тех процессов, долгосрочный прогноз которых подвержен множеству изменчивых факторов, принят «сценарный подход» [25]. Он реализуется в двух типах оценок безопасности: детерминистском и вероятностном.

При детерминистском подходе прогнозные расчеты выполняются по ансамблям многочисленных сценариев, описывающих вероятную эволюцию могильника. Под сценарием эволюции понимается «одна из возможных последовательностей связанных между собой событий, явлений и факторов природного и техногенного происхождения и физико-химических процессов, определяющих эволюцию системы захоронения РАО, миграцию радионуклидов в окружающую среду и уровни облучения человека» [12]. В современной практике используются два метода выявления факторов, событий и процессов (ФСП)⁴ / features, events and processes (FEPs) [25]. Один из этих подходов (a bottom-up approach⁵) начинается с анализа внешних событий или условий (изменения климата, изначальные дефекты канистр и др.), которые могут запустить изменения в системе захоронения или воздействовать на ее надежность. Другой подход к разработке сценариев (a top-down approach) начинается с анализа пригодности защитных барьеров выполнять свои защитные функции и удерживать радионуклиды в течение необходимого периода времени.

⁴ Здесь англоязычное слово «features» вслед за НП-055-14 переведено как «факторы». В русской версии глоссария МАГАТЭ оно переведено как «характеристики». Возможен также перевод как «особенности».

⁵ «Top-down» и «bottom-up». В методологии системного подхода это обозначение стратегий обработки информации и приобретения знаний («нисходящий» и «восходящий» подходы).

В мире созданы базы ФСП, которые рассчитаны или на все типы могильников как, например, общеевропейская база [39], или ориентированы на условия изоляции в кристаллических породах, как шведская или финская. Выявленные ФСП комбинируются в отдельные возможные сценарии эволюции системы захоронения. Расчеты по достаточно полному ансамблю сценариев должны дать адекватную основу для достоверного прогноза.

Имеющиеся базы ФСП, составленные для зарубежных проектов, невозможно непосредственно перенести на проект Енисейский. Это связано с особенностями размещаемых отходов, оригинальным проектом компоновки СИБ и геологическими условиями [40].

В качестве дополнения к традиционному детерминистскому подходу оценки радиологических последствий может быть использована методология их вероятностной оценки. Вероятностная оценка безопасности (Probabilistic Safety Assessment) основана на вероятностном подходе к распознаванию сценариев, обобщению значений параметров и назначению математического инструментария для получения численных оценок дозы/риска [41]. В проведении ОБ по вероятностной методологии выделяется 3 этапа. Этап 1-й включает анализ опасных событий, причиняющих основной вред, и определение их частотности. Этап 2-й включает анализ реакции радиоактивных отходов на эти события и оценку частотности и величины утечек радионуклидов в окружающую среду. Этап 3-й состоит в анализе последствий утечек, оценке доз и рисков для населения.

Каждый из этих двух подходов (детерминистский и вероятностный) имеет достоинства и ограничения, и важно понимать, что они оба не способны дать однозначный прогноз поведения системы, а только оценивают пределы возможного влияния радиоизотопов на биосферу и население [42].

Проблема доверия

С обоснованием безопасности связана «проблема доверия» к достоверности значений тех индикаторов безопасности, которые будут получены в результате численного моделирования на период после закрытия хранилища в отдаленном будущем [13]. Считается, что загрузка хранилища может начаться только тогда, когда все заинтересованные стороны (оператор, регулятор, местные власти и общественность) будут уверены в том, что хранилище будет исполнено так, как запроектировано. На практике выясняется, что нет ясных механизмов и критериев того, когда вопрос о доверии следует считать закрытым [43]. Из-за остающихся неопределенностей нет однозначного ответа на вопрос о том, сколько и какие еще исследования нужно

провести, чтобы быть уверенным в полученных оценках и начать практическую загрузку ВАО или ОЯТ в могильник. Исследования в этом направлении крайне востребованы.

Проблемой доверия можно объяснить особое внимание, которое в последние годы привлекли вопросы управления качеством выполнения технической части проектов. Поскольку утечки радиоактивности из-за возможных просчетов и ошибок сегодняшних исполнителей обнаружатся в биосфере не ранее, чем через сотни и тысячи лет, возникает «эффект отложенного наказания» за некачественное выполнение работ. Это предъявляет исключительные требования к исполнителям и привлекает особое внимание к ним со стороны контролирующих структур и общественности.

Проблему доверия, считают эксперты, легче решить, когда информация по проектам геологического захоронения, в том числе Енисейскому, максимально открыта не только специалистам, занятым в проекте, но и сторонним наблюдателям — представителям научного общества и широкой общественности.

Заключение

Из общей концепции глубокоэшелонированного обеспечения безопасности населения и окружающей среды вытекает важное следствие: ни одна функция барьера или барьер в целом не могут считаться достаточными до тех пор, пока не выполнена оценка безопасности всей системы мультимарьерного могильника. В настоящее время состояние исследований по Енисейскому проекту не позволяет дать окончательных оценок безопасности системы в целом, надежности и защитных функций барьеров.

Мультимарьерная конструкция могильника, технические решения которой предложены сегодня, потребует выполнения рутинных научно-исследовательских работ, которые помогут обеспечить уровень надежности проекта, достижимый при существующих знаниях и технологиях.

Своя задача есть и у академической науки — обозначить максимально возможный уровень обоснования надежности геологического захоронения РАО. Этот уровень покажет то возможное состояние изученности и степени доказательств его безопасности, к чему обязаны стремиться проектные организации и оператор, и то невозможное, чего не вправе требовать органы надзора и представители общественных экологических движений.

Литература

1. Кудрявцев Е. Г., Гусаков-Станюкович И. В., Камнев Е. Н., Лобанов Н. Ф., Бейгул В. П. Федеральный объект подземного захоронения отвержденных радиоактивных отходов в России: практические

шаги к созданию // Безопасность окружающей среды. 2008. № 4. С. 106—112.

2. Дорофеев А. Н., Большов Л. А., Линге И. И., Уткин С. С., Савельева Е. А. Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 33—42.

3. Абрамов А. А., Бейгул В. П. Создание подземной исследовательской лаборатории на участке «Енисейский» Нижнеканского массива: состояние и дальнейшее развитие работ. — URL: <http://www.atomic-energy.ru/articles/2017/08/22/78690>.

4. Rethinking High-Level Radioactive Waste Disposal: A Position Statement of the Board on Radioactive Waste Management. — Washington, D.C.: National Acad. Press, 1990. 44 p.

5. Disposition of High-Level Waste and Spent Nuclear Fuel. The Continuing Societal and Technical Challenges. — Washington, D.C.: National Acad. Press, 2001. 198 p.

6. International Approaches for Deep Geological Disposal of Nuclear Waste: Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation.: Fifth Worldwide Review, prepared for: U.S. Department of Energy / B. Faybishenko, J. Birkholzer, D. Sassani, P. Swift / LBNL-1006984, 2016. 474 p.

7. Laverov N. P., Yudintsev S. V., Kochkin B. T., and Malkovsky V. I. The Russian Strategy of using Crystalline Rock as a Repository for Nuclear Waste // Elements. 2016. V. 12. Pp. 253—256.

8. МАГАТЭ. основополагающие принципы безопасности. Основы безопасности: Серия норм МАГАТЭ по безопасности, № SF-1. — Вена: МАГАТЭ, 2007. 34 с.

9. НП-058-04. Безопасность при обращении с радиоактивными отходами. Общие положения. — М.: Ростехнадзор, 2004. 17 с.

10. МАГАТЭ. Подземное захоронение радиоактивных отходов. Основное руководство. Серия изданий по безопасности № 54. — Вена: МАГАТЭ, 1981. 45 с.

11. МАГАТЭ. Захоронение радиоактивных отходов. Конкретные требования безопасности, № SSR-5. — Вена: МАГАТЭ, 2011. 104 с.

12. НП-055-14. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности. — М.: Ростехнадзор, 2014. 21 с.

13. Falck W. E., Nilsson K.-F. Geological Disposal of Radioactive Waste: Moving Towards Implementation. — Luxembourg: European Communities, 2009. 52 p.

14. Капица С. П., Курдюмов С. П., Малинецкий Г. Г. Синергетика и прогнозы будущего. — М.: Едиториал УРСС. 2003. 288 с.

15. Коренков А. П. Основные положения по оценке надежности захоронения отвержденных радиоактивных отходов // Атомная энергия. 1992. Т. 73. Вып. 1. С. 65—69.

16. Nitschke R. L. Performance assessment — risk assessment vive la differences // Proc. of the Sixth International Conference on radioactive waste

- management and environmental remediation (ICEM'97) held in Singapore. October 12-16, 1997. — New York: The Amer. Soc. of Mechanical Engineers, 1997. P. 167—170.
17. Confidence in the Long-Term Safety of Deep Geological Repositories — Its. Development and Communication. — Paris: OECD/NEA, 1999.
18. Post-Closure Safety Case for Geological Repositories. Nature and Purposes. NEA №. 3679. — Paris: OECD, 2004. 56 p.
19. International experiences in safety cases for geological repositories (INTESC). NEA №6251. Paris: OECD/NEA, 2009. 204 p.
20. The Safety Case for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: 2013 State of the Art. // Symposium Proceedings. 7—9 October 2013. Paris, France. NEA/RWM/R(2013)9. — Paris: OECD NEA, 2014. 452 p.
21. IAEA. The Management System for Facilities and Activities. Safety Requirements. IAEA Safety Standards Series N GS-R-3. — Vienna: IAEA, 2006.
22. РБ-050-09. Состав и содержание отчета по обоснованию безопасности хранилищ твердых радиоактивных отходов. — М.: Ростехнадзор, 2009. 96 с.
23. НП-100-17. Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов. — М.: Ростехнадзор, 2017. 122 с.
24. Long-term safety for KBS-3 Repositories at Forsmark and Laxemar — A First Evaluation.: Main report of the SR-Can project. SKB TR-06-09. — Svensk Kärnbränslehantering AB, 2006. — URL: <http://www.skb.se/upload/publications/pdf/TR-06-09webb.pdf>.
25. Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. Outcomes of the NEA MeSA Initiative. — Paris: OECD/NEA Publishing, 2012. 242 p.
26. Becker D-A., Buhmann D., Storck R. et al. Testing of Safety and Performance Indicators (SPIN). Report, 2002. EUR 19965 EN. / Brussels: European Commission, 2003. 100 p.
27. Becker D-A., Cormenzana J-L, Delos A. et al. Safety Indicators and Performance Indicators. Brussels: EC, 2009. — URL: <http://www.ip-pamina.eu/downloads/pamina3.4.2.pdf>.
28. IAEA. Natural Activity Concentrations and Fluxes as Indicators for the Safety Assessment of Radioactive Waste Disposal.: Results of a Coordinated Research Project. IAEA-TECDOC-1464. Vienna: — IAEA, 2005.
29. Considering Timescales in the Post-closure Safety of Geological Disposal of Radioactive Waste. NEA № 6424. — Paris: OECD-NEA, 2009. 159 p.
30. Performance Assessment Methodologies in Application to Guide the Development of the Safety Case. PAMINA. (FP6-036404). — Brussels: EC, 2011. 196 p. — URL: <http://www.ip-pamina.eu/>.
31. НРБ-99/2009. Новые санитарные правила СанПин 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности».
32. ОСПОРБ-99/2010. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 26.04.2010 № 40 (ред. от 16.09.2013). Об утверждении СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)».
33. Бешелев С. Д., Гурвич Ф. Г. Экспертные оценки. — М.: Наука, 1973. 159 с.
34. Bonano E. J., Cranwell R. M. Treatment of uncertainties in the performance assessment of geologic high-level radioactive waste repositories // *Mathemat. Geol.* 1988. V. 20. № 5. P. 543-565.
35. Disposal of Radioactive Waste: Review of Safety Assessment Methods. — Paris: OECD / NEA, 1991.
36. Apostolakis G. The concept of probability in safety assessment of technological systems // *Science.* 1990. V. 250. № 4986. P. 1359—1364.
37. Кочкин Б. Т. Геологические неопределенности в оценке безопасности систем захоронения отходов // *Геоэкология.* 2004. № 2. С. 142—153.
38. IAEA. Safety indicators for the safety assessment of radioactive waste disposal. IAEA-TECDOC-1372. — Vienna: IAEA, 2003. 41 p.
39. Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste. An International Database. — Paris: OECD-NEA, 2000. 88 p.
40. Кочкин Б. Т., Мальковский В. И., Юдинцев С. В. Научные основы оценки безопасности геологической изоляции долгоживущих радиоактивных отходов (Енисейский проект). — М.: ИГЕМ РАН, 2017. 384 с.
41. IAEA. Procedures for conducting probabilistic safety assessment for non-reactor nuclear facilities. IAEA-TECDOC-1267. — Vienna: IAEA, 2002. 65 p.
42. IAEA. Scientific and technical basis for geological disposal of radioactive wastes: Technical reports series № 413. — Vienna: IAEA, 2003. 90 p.
43. Establishing and communicating confidence in the safety of deep geological disposal approaches and arguments. — Paris: OECD-NEA, 2002. 186 p.

Информация об авторах:

Кочкин Борис Тимофеевич, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017 Москва, Старомонетный пер., 35), e-mail: btk@igem.ru.

Библиографическое описание статьи

Кочкин Б. Т. Оценка безопасности геологических хранилищ ВАО и ОЯТ: международный опыт в приложении к Енисейскому проекту // *Радиоактивные отходы.* — 2018. — № 2 (3). — С. 18 – 29.

THE SAFETY ASSESSMENT OF GEOLOGICAL REPOSITORIES
OF HLW AND SNF: THE INTERNATIONAL EXPERIENCE
IN THE APPLICATION TO THE YENISEI PROJECT

Kochkin B. T.

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Nuclear safety institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received 05 March 2018

The article summarizes the results of the work of international expert groups dealing with general safety issues of the HLW and SNF geological isolation. It presents the main recommendations related to the methodology, procedures, terminology and regulatory requirements for safety assessment, as well as the possibilities of applying these recommendations in the implementation of the Yenisei project.

Key words: radioactive waste, geological repository, safety assessment.

References

1. Kudryavcev E. G., Gusakov-Stanyukovich I. V., Kamnev E. N., Lobanov N. F., Bejgul V. P. Federal'nyj ob'ekt podzemnogo zahoroneniya otverzhdennyh radioaktivnyh othodov v Rossii: prakticheskie shagi k sozdaniyu. *Bezopasnost' okruzhayushchej sredy*, 2008, no. 4. pp. 106—112.
2. Dorofeev A. N., Bol'shov L. A., Linge I. I., Utkin S. S., Savel'eva E. A. Strategic Master Plan for R&D Demonstrating the Safety of Construction, Operation and Closure of a Deep Geological Disposal Facility for Radioactive Waste. *Radioactive Waste*, 2017, no 1, pp. 33—42. (In Russian).
3. Abramov A. A., Bejgul V. P. Sozdanie podzemnoj issledovatel'skoj laboratorii na uchastke «Enisejskij» Nizhnekanskogo massiva: sostoyanie i dal'nejshee razvitie rabot. URL: <http://www.atomic-energy.ru/articles/2017/08/22/78690>
4. Rethinking High-Level Radioactive Waste Disposal: A Position Statement of the Board on Radioactive Waste Management. Washington, D.C.: National Acad. Press, 1990. 44 p.
5. Disposition of High-Level Waste and Spent Nuclear Fuel. The Continuing Societal and Technical Challenges. Washington, D.C.: National Acad. Press, 2001. 198 p.
6. International Approaches for Deep Geological Disposal of Nuclear Waste: Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation. Fifth Worldwide Review, prepared for: U.S. Department of Energy by B. Faybishenko, J. Birkholzer, D. Sassani, P. Swift. LBNL-1006984, 2016, 474 p.
7. Laverov N. P., Yuditsev S. V., Kochkin B. T., and Malkovsky V. I. The Russian Strategy of using Crystalline Rock as a Repository for Nuclear Waste. *Elements*, 2016, v. 12, pp. 253—256.
8. MAGATEH. Osnovopolagayushchie principy bezopasnosti. Osnovy bezopasnosti. Seriya norm MAGATEH po bezopasnosti, № SF-1. Vena: MAGATEH, 2007. 34 s.
9. NP-058-04. Bezopasnost' pri obrashchenii s radioaktivnymi othodami. Obshchie polozheniya. M.: Rostekhnadzor, 2004. 17 s.
10. MAGATEH. Podzemnoe zahoronenie radioaktivnyh othodov. Osnovnoe rukovodstvo. Seriya izdaniy po bezopasnosti no 54. Vena: MAGATEH, 1981. 45 s.
11. MAGATEH. Zahoronenie radioaktivnyh othodov. Konkretnye trebovaniya bezopasnosti, № SSR-5. Vena: MAGATEH, 2011. 104 s.
12. NP-055-14. Zahoronenie radioaktivnyh othodov. Principy, kriterii i osnovnye trebovaniya bezopasnosti. M.: Rostekhnadzor, 2014. 21 s.
13. Falck W. E., Nilsson K.-F. Geological Disposal of Radioactive Waste: Moving Towards Implementation. Luxembourg: European Communities, 2009. 52 p.
14. Kapica S. P., Kurdyumov S. P., Malineckij G. G. Sinergetika i prognozy budushchego. M.: Editorial URSS. 2003. 288 p.
15. Korenkov A. P. Osnovnye polozheniya po ocenke nadezhnosti zahoroneniya otverzhdennyh radioaktivnyh othodov // *Atomnaya ehnergiya*. 1992. T. 73. Vyp. 1. S. 65-69.
16. Nitschke R. L. Performance assessment — risk assessment vive la differences. Proc. of the Sixth International Conference on radioactive waste management and environmental remediation (ICEM'97) held in Singapore. October 12-16, 1997. New York: The Amer. Soc. of Mechanical Engineers, 1997. P. 167-170.
17. Confidence in the Long-Term Safety of Deep Geological Repositories — Its. Development and Communication. Paris: OECD/NEA, 1999.

18. Post-Closure Safety Case for Geological Repositories. Nature and Purposes. NEA no. 3679. Paris: OECD, 2004. 56 p.
19. International experiences in safety cases for geological repositories (INTESC). NEA no 6251. Paris: OECD/NEA, 2009. 204 p.
20. The Safety Case for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: 2013 State of the Art. Symposium Proceedings. 7–9 October 2013. Paris, France. NEA/RWM/R(2013)9. Paris: OECD NEA, 2014. 452 r.
21. IAEA. The Management System for Facilities and Activities. Safety Requirements. IAEA Safety Standards Series N GS-R-3. Vienna: IAEA, 2006.
22. RB-050-09. Sostav i sodержanie otcheta po obosnovaniyu bezopasnosti hranilishch tverdyh radioaktivnyh othodov. M.: Rostekhnadzor, 2009. 96 s.
23. NP-100-17. Trebovaniya k sostavu i sodержaniyu otcheta po obosnovaniyu bezopasnosti punktov zahoroneniya radioaktivnyh othodov. M.: Rostekhnadzor, 2017. 122 s.
24. Long-term safety for KBS-3 Repositories at Forsmark and Laxemar – A First Evaluation. Main report of the SR-Can project. SKB TR-06-09. Svensk Kärnbränslehantering AB, 2006. www.skb.se/upload/publications/pdf/TR-06-09webb.pdf.
25. Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. Outcomes of the NEA MeSA Initiative. Paris: OECD/NEA Publishing, 2012. 242 p.
26. Becker D-A., Buhmann D., Storck R. et al. *Testing of Safety and Performance Indicators (SPIN)*. Report, 2002. EUR 19965 EN / Brussels: European Commission, 2003. 100 p.
27. Becker D-A., Cormenzana J-L, Delos A. et al. Safety Indicators and Performance Indicators. Brussels: EC, 2009 (www.ip-pamina.eu/downloads/pamina3.4.2.pdf).
28. IAEA. Natural Activity Concentrations and Fluxes as Indicators for the Safety Assessment of Radioactive Waste Disposal. Results of a Coordinated Research Project. IAEA-TECDOC-1464. Vienna: IAEA, 2005.
29. Considering Timescales in the Post-closure Safety of Geological Disposal of Radioactive Waste. NEA № 6424. Paris: OECD-NEA, 2009. 159 p.
30. Performance Assessment Methodologies in Application to Guide the Development of the Safety Case. PAMINA. (FP6-036404). Brussels: EC, 2011. 196 p. URL: <http://www.ip-pamina.eu/>.
31. NRB-99/2009. Novye sanitarnye pravila SanPin 2.6.1.2523-09 “Normy radiacionnoj bezopasnosti / NRB-99/2009”.
32. OSPORB-99/2010. Postanovlenie Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 26.04.2010 №40 (red. ot 16.09.2013). Ob utverzhdenii SP 2.6.1.2612-10 “Osnovnye sanitarnye pravila obespecheniya radiacionnoj bezopasnosti (OSPORB-99/2010)”.
33. Beshelev S. D., Gurchich F. G. Ekspertnye ocenki. M.: Nauka Publ., 1973, 159 p. (In Russian).
34. Bonano E. J., Cranwell R. M. Treatment of uncertainties in the performance assessment of geologic high-level radioactive waste repositories. *Mathemat. Geol.*, 1988, v. 20, no 5, pp. 543–565.
35. Disposal of Radioactive Waste: Review of Safety Assessment Methods. Paris: OECD / NEA, 1991.
36. Apostolakis G. The concept of probability in safety assessment of technological systems. *Science*, 1990, v. 250, no 4986, pp. 1359-1364
37. Kochkin B. T. Geologicheskie neopredelennosti v ocenke bezopasnosti sistem zahoroneniya othodov. *Geoekologiya*, 2004, no 2, pp. 142-153.
38. IAEA. Safety indicators for the safety assessment of radioactive waste disposal. IAEA-TECDOC-1372. Vienna: IAEA, 2003. 41 p.
39. Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste. An International Database. Paris: OECD-NEA, 2000. 88 p.
40. Kochkin B. T., Mal'kovskij V. I., Yudincev S. V. Nauchnye osnovy ocenki bezopasnosti geologicheskoy izolyacii dolgozhivushchih radioaktivnyh othodov (Enisejskij proekt). M.: IGEM RAN, 2017. 384 s. (In Russian).
41. IAEA. Procedures for conducting probabilistic safety assessment for non-reactor nuclear facilities. IAEA-TECDOC-1267. Vienna: IAEA, 2002. 65 p.
42. IAEA. Scientific and technical basis for geological disposal of radioactive wastes. Technical reports series № 413. Vienna: IAEA, 2003. 90 p.
43. Establishing and communicating confidence in the safety of deep geological disposal approaches and arguments. Paris: OECD-NEA, 2002. 186 p.

Information about the authors

Kochkin Boris Timofeevich, Doctor of Geological Science, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, (35, Staromonetnyj lane, Moscow, Russia, 119017), e-mail: btk@igem.ru.

Bibliographic description

Kochkin B. T. The Safety Assessment of Geological Repositories of HLW and SNF: the International Experience in the Application to the Ytnisei Project. *Radioactive Waste*, 2018, no 2 (3), pp. 18–29. (In Russian).