О СОЗДАНИИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА ПО ОБРАЩЕНИЮ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ ФГУП «РАДОН»

А. В. Лужецкий¹, Ю. В. Невров¹, М. В. Ведерникова², А. Ю. Иванов², Ин. И. Линге²,
Г. Д. Неуважаев², Е. А. Савельева², В. И. Шпиньков², А. В. Понизов³

¹ФГУП «Объединенный эколого-технологический и научно-исследовательский центр по обезвреживанию радиоактивных отходов и охране окружающей среды», Москва

²Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

³ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва

Статья поступила в редакцию 12 февраля 2020 г.

В работе рассмотрена текущая ситуация с созданием интегральной информационной модели объекта обращения с радиоактивными отходами на примере площадки ФГУП «РАДОН». Приведены результаты построения информационной 3D-модели объекта, созданной с учетом данных натурного лазерного сканирования и анализа проектной документации, а также сведения о построении трехмерной детализированной гидрогеологической модели площадки. Обсуждаются вопросы построения гидрогеологической модели ближней зоны, а также общие перспективы использования интегральных цифровых моделей объектов хранения и захоронения радиоактивных отходов для целей обоснования безопасности, в том числе долговременной. Приведены перспективные направления использования и развития интегральных моделей, и перечень мероприятий по повышению эффективности построения и использования моделей.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, информационное моделирование, информационная модель, площадка размещения пунктов хранения радиоактивных отходов, миграционное моделирование, долговременная безопасность, Osborne радиоактивные отходы, вывод из эксплуатации.

Введение

Методы долгосрочного планирования в увязке с вопросами безопасности стали достаточно активно применяться в отношении отдельных объектов и их комплексов в атомной отрасли. Целесообразность информационного моделирования, включающего создание так называемых цифровых (информационных) двойников объектов для этих задач, равно как и собственно их наличие, также неоднократно декларировалась

и обосновывалась [1]. Информационное моделирование площадки включает в себя как процесс создания ее цифрового двойника с использованием результатов полевых исследований (например, лазерной съемки), так и архивных данных (проектная, эксплуатационная документация) и другой информации (результаты исследования площадки и др.). Требования к составу данных и уровню их детальности определяются

постановкой задачи информационного моделирования. Информационное моделирование особенно важно для объектов захоронения и длительного хранения радиоактивных отходов (РАО). Фактический опыт реализации всей технологической цепочки (цифровой двойник — анализ вариантов состояний — выбор стратегии — уточняющее комплексное инженерное и радиационное обследование — проект вывода из эксплуатации или захоронения на месте — создание новых производств) в рамках одной информационной платформы в отечественном опыте не описан. Совокупность указанных возможностей, задач стратегического планирования и цифрового развития с учетом требований органов государственного регулирования безопасности в области использования атомной энергии в отношении исторических объектов [2] инициировала постановку во ФГУП «РАДОН» работ по созданию цифрового двойника (интегральной информационной модели) промышленного комплекса по обращению с РАО. В качестве первоочередных задач, обеспечиваемых цифровым двойником объекта, были определены задачи вариантного долговременного прогнозирования безопасности хранилищ РАО. В этой связи требования к уровням проработки геометрических и атрибутивных данных модели несколько ниже, чем для разработки проектной и исполнительной документации и управления эксплуатацией.

В определенном смысле работы по площадке ФГУП «РАДОН» могут оказаться первым масштабным опытом в данной области, сочетающим решение вопросов наследия и развития площадок. Целью статьи является раскрытие примененных методов и результатов начальной стадии работ, а также рекомендации по выполнению аналогичных работ по иным промышленным площадкам в будущем.

Промышленный комплекс ФГУП «РАДОН» по обращению с РАО

ФГУП «РАДОН» 60 лет назад стало первым в СССР специализированным предприятием по обращению с РАО. Уже в начале 60-х годов прошлого века предприятие п/я № 662, как тогда назывался ФГУП «РАДОН», смогло существенно «разгрузить» временные хранилища РАО, созданные в крупных научных центрах Москвы. В последующем плановый вывоз, переработка и хранение РАО из организаций центрального региона России стали сопровождаться научно-практическими работами в области их переработки. По многим направлениям эти работы

имели пионерный характер. Среди них создание средств транспортирования, разработка и внедрение в практику процессов и установок для переработки и кондиционирования РАО (остекловывание, цементирование. Компактирование), создание системы мониторинга радиационной обстановки и многие другие [3]. В настоящее время перед предприятием поставлена задача формирования перспективного промышленного комплекса, способного стать ключевой организацией по завершающим стадиям жизненного цикла объектов наследия.

Основной промышленной площадкой предприятия все эти годы являлся комплекс, расположенный в районе г. Сергиев Посад. Площадка ФГУП «РАДОН» изначально была разделена на две зоны — «чистую» и зону контролируемого доступа (ЗКД). На территории последней были размещены железобетонные приповерхностные хранилища, не предусматривающие возможность извлечения РАО. В соответствии с действовавшими на тот период времени требованиями в области безопасности, после завершения размещения твердых РАО они консервировались путем создания покрывающего экрана. При необходимости осуществлялась реконструкция этих барьеров, в отношении ряда объектов были проведены работы по заполнению пустот буферным материалом (цементной смесью). Сегодня в рамках расширения полезных объемов для хранения РАО над частью хранилищ были сооружены ангары, в которых отходы размещаются на временное хранение адресно в контейнерах. В настоящее время в ЗКД помимо комплекса приповерхностных сооружений, предназначенных для долговременного хранения твердых РАО (ХТО 1–34, СБД, здание 69, сооружение 103) и жидких РАО (ХЖО, БЖ), размещен также комплекс установок по переработке РАО. При эксплуатации промышленного комплекса выполнялись требования эксплуатационной безопасности в соответствии с действующими нормативными документами.

Длительный период пребывания предприятия за рамками атомной отрасли не может характеризоваться однозначно. С одной стороны, имелось относительно устойчивое финансирование правительством Москвы, с другой — имела определенная отстраненность от практических задач отрасли, в том числе от задач формирования единой государственной системы обращения с РАО на первом этапе ее развития. Этими причинами во многом объясняется, что в рамках первичной регистрации РАО не в полной мере была определена долгосрочная стратегия в отношении сооружений для хранения

РАО, многие из которых изначально создавались как могильники, т. е. как объекты окончательного размещения РАО без намерения их извлечения.

В ходе первичной регистрации РАО, проведенной в 2014 году, все 43 объекта ФГУП «РАДОН» с накопленными РАО были отнесены к пунктам долговременного хранения, а решения по их отнесению к особым и/или удаляемым были отложены до 2030 года. Объем накопленных РАО составил более 130 тыс. м³. Подобная нерешенность по долгосрочной стратегии характерна для многих Специализированных комбинатов бывшей системы «РАДОН», в том числе ныне находящихся за границами России [4].

Об условиях выработки долгосрочной стратегии

Для успешной разработки долгосрочной стратегии развития площадки, в первую очередь, должны быть выполнены современные нормативные требования, согласно которым необходимо установить тип накопленных РАО (особые или удаляемые) и в зависимости от этого определить последующие этапы обращения с ними. Для объектов хранения удаляемых РАО должны быть предусмотрены этапы: извлечение, переработка с целью приведения в соответствие с критериями приемлемости для захоронения и захоронение на объектах национального оператора по обращению с РАО. Для РАО, отнесенных к категории «особых»: перевод в категорию пункта размещения или консервации РАО и последующее преобразование в пункт захоронения РАО.

Во вторую очередь, должна быть сформулирована стратегическая цель преобразования промышленной площадки в целом. В настоящее время она определена таким образом: формирование двух эффективных и безопасных комплексов — захоронения (совокупность приповерхностных ПЗРО) с необходимостью его передачи национальному оператору по обращению с РАО и переработки РАО (опытно-экспериментальные и промышленные производства). Соотношение между ними должно быть установлено на основе оценки и обоснования долговременной безопасности исторических объектов. Принято также, что критериями в отношении исторических объектов будут не только установленные для отнесения к особым РАО критерии (коллективные эффективные дозы облучения, риски и затраты), но и иные, связанные с перспективами использования площадки размещения новых объектов. Другими словами,

по части объектов может быть принято решение по удалению или перезагрузке РАО, если будет установлено, что на этом участке может быть сооружен новый объект с существенно большей емкостью или обеспеченный барьерами безопасности для «более сложных» РАО.

Стадийность решения поставленной задачи понятна: оценка и, при возможности, обоснование долговременной безопасности для каждого из исторических объектов (с проведением дополнительных исследований и оценок если это необходимо); оптимизация конфигурации комплексов промышленной переработки РАО; вариантная оценка и обоснование инвестиций в развитие; принятие стратегических решений по развитию.

Информационная модель площадки

Решаемые задачи первой стадии в основном сосредоточены на систематизации исходных данных для оценки долговременной безопасности, которые, как и для всех иных исторических объектов, не всегда находятся в должных условиях и в большинстве случаев не подвергались современным методам обработки и анализа. Требования в отношении данных по РАО сформулированы давно, но на протяжении десятилетий они концентрировались на формальном исполнении требований по фиксации отдельных процедур и операций, а не на долговременной сохранности информации и ее активном использовании. В решающей степени это было обусловлено существовавшими возможностями машинной обработки данных. Сегодня в условиях активной цифровизации всех сфер деятельности необходимо вести речь о создании цифрового двойника промышленной площадки и не ограничиваться вопросами демонстрации трехмерных изображений объектов, сопровождения рутинных технологических операций и выполнения большого объема требований [5] по обращению с информацией по сооружениям и хранимым в них отходам. Можно предположить, что в ближайшие годы наличие цифрового двойника будет обязательным требованием органов регулирования безопасности, поскольку только при его наличии или на его основе может быть доказано, что: эксплуатирующая организация полностью владеет информацией по площадке, объектам и материалам на ней размещенным; организовано применение всей совокупности современных методов расчета характеристик безопасности; осуществляется анализ данных с учетом последствий аварий; осуществлено цифровое проектирование новых объектов и работ

Рис. 1. Общая схема расположения станций сканирования площадки объекта (желтый треугольник – станция сканирования, оранжевые и желтые поля – точки лазерного сканирования)

Рис. 2. Общий вид модели «как есть» (а) (цветовая палитра «по уровню» (б) соответствует относительной высоте точек лазерного сканирования относительно друг друга)

по историческим объектам; должным образом сохранена информация.

Для создания информационной модели зданий и сооружений площадки ФГУП «РАДОН» в 2019–2020 годах были выполнены первоочередные работы по 5 основным направлениям.

1. С применением современного оборудования (лазерный сканер Leica) проведена лазерная съемка всех объектов промышленной площадки. Всего осуществлены измерения на более чем 900 станциях сканирования, в том числе более 200 — внутри помещений. Полученные по результатам лазерного сканирования первичные данные, так называемые «несшитые облака точек лазерного сканирования»,

архивированы и применены для доработки информационной модели комплекса. Выбор расположения станций на площадке осуществлялся исходя из характеристик прибора и особенностей рельефа с тем, чтобы вся промышленная площадка была надежно восстановлена. Сшивку файлов облаков точек лазерного сканирования в единый проект и обработка ошибок были выполнены в специализированном программном пакете Leica Register. Общая схема расположения станций сканирования на площадке объекта представлена именно на таком сшитом изображении (рис. 1, 2). Созданная модель уже представляет практический интерес, поскольку, например, позволит

Рис. 3. Фрагмент информационной модели с атрибутами данных объекта

Рис. 4. Анализ коллизии модели «как есть» и модели «как спроектировано» по объекту ХТО 8, 8а

Рис. 5. Визуализация коллизии модели «как есть» и модели «как спроектировано» по объекту ХТО 8, 8а на совмещенных моделях

в последующем осуществлять мониторинг состояния поверхностей зданий и сооружений, в том числе стабильности покрывающих экранов с фиксацией их миллиметровых отклонений от уровня 2019 года. В целом применение данной технологии для контроля технического состояния объектов представляется весьма перспективным в связи с ее высокой производительностью. Так, например, повторная съемка всех водоотводящих сооружений площадки потребует менее суток работы на площадке и менее недели камеральной работы компактной группы специалистов.

2. Извлечено из архивов более 100 единиц проектной документации. На их основе построены так называемые информационные модели зданий, сооружений и элементов оборудования в состоянии «как спроектировано», заполнены необходимые атрибуты данных модели (рис. 3).

Первые же опыты сопоставления моделей «как спроектировано» и «как есть» показали определенные коллизии. Анализ моделей (рис. 4) и последующая визуальная идентификация коллизии, например, по ХТО 8, 8а (рис. 5, 6), позволили организовать работу по устранению основных несоответствий информационной модели фактическому состоянию площадки. Отметим, что такого рода нестыковки достаточно распространенное явление [1].

Рис. 6. Общий вид модели «как есть» (цветовая палитра соответствует относительной высоте)

3. Выраженный прогресс в части сбора и восстановления данных по характеристикам накопленных РАО. До последнего времени единого алгоритма восстановления характеристик РАО размещенных в хранилищах несколько десятилетий назад, не выработано. Анализ данных журналов учета размещения РАО в хранилища не позволяет выявить такие характеристики как удельная активность, вес, объем и т. д. отдельных упаковок размещенных в первый период эксплуатации объектов ФГУП «РАДОН» отходов. Только в отношении части объектов удалось получить неконсервативные оценки количества (объема) размещенных РАО. Наиболее сложная ситуация по объектам, закрытым в первые годы функционирования предприятия (рис. 7, 8, табл. 1). Например, выполненные в 2018 году работы по вскрытию барьеров безопасности и извлечению РАО из ХТО-2, законсервированного в 1961 году, показали, что активности накопленных отходов значительно ниже уровней, указанных в сохранившихся журналах учета (на уровне очень низкоактивных и низкоактивных РАО). Проведенный анализ данных, в том числе по загрязнению грунтовых вод вблизи объектов позволил сделать вывод, что в отношении 8 объектов необходим углубленный анализ ситуации. Эти объекты (выделены красным на рис. 8) характеризуются наибольшими значениями учетных данных по активности и, по-видимому, их наибольшими неопределенностями.

4. Систематизация данных, характеризующих состояние окружающей среды в районе расположения объектов наследия. Радиационная обстановка за пределами зоны контролируемого доступа ФГУП «РАДОН» может быть охарактеризована как благополучная. В данной части выполненные работы позволили лишь актуализировать форму представления данных и упростить доступ к ним. Индустриализация района

Рис. 7. Распределение объемов и активности РАО по годам закрытия объектов

Рис. 8. Распределение объектов хранения РАО по объемам и активности РАО

Таблица 1. Группировка пунктов хранения с учетом состояния барьеров безопасности, типов пунктов хранения, способа размещения РАО

N	ХТО №	Тип ПХ	Год окончания размещения РАО	Тип размещения РАО	Состояние
1	1, 3–5	Заглубленные из ж/б конструкций	1961	навалом, с проливкой пустот цементным раствором на основе ЖРО	«законсервированы», создан покрывающий экран
2	6–10	Заглубленные из сборных ж/б конструкций с наземной частью (двухъярусное)	1973-1981		
3	11–26	Заглубленные из ж/б конструкций	1973-1981		
4	27–29, 36	Заглубленные из монолитного ж/б	1999-2001		
5	30–34	Заглубленные из монолитного ж/б, с наземным металлическим павильоном	наземная часть не закрыта	поярусное размещение упаковок (НЗК, КМЗ, КРАД), в подземной части с засыпкой пустот глинопопорошком	заглубленные емкости «законсервированы» (асфальт)

расположения промышленной площадки также не представляет проблемы для выполнения последующих оценок долговременной безопасности, поскольку они будут основываться на традиционных цепочках поступления радионуклидов в пищевую продукцию, а любая индустриализация сельскохозяйственного производства и урбанистическое развитие поселений уменьшают дозы облучения населения.

5. Систематизация данных для обоснования долговременной безопасности хранения/захоронения РАО. В этом случае речь идет о геологической, гидрогеологической и гидрологической информации, метеоданных, данных мониторинга недр, движениях земной коры и многих других видах данных. Их обобщение и внесение в информационную модель позволяют отследить эволюцию природных процессов/явлений во времени, а также лягут в основу прогноза их дальнейшей динамики.

С момента ввода в эксплуатацию объектов ФГУП «РАДОН» на промплощадке и прилегающей территории проводился анализ факторов и процессов, определяющих миграцию радионуклидов в окружающую среду, а затем прогнозные расчеты распространения радиоактивного загрязнения из хранилищ, сначала по эмпирическим формулам (начиная с 1978 г.), в дальнейшем с использованием неспециализированного программного средства инженерных вычислений, например, Mathcad 14. Сегодня создана новая трехмерная модель дальней зоны в районе размещения ФГУП «РАДОН», предназначенная для выполнения расчетов нестационарных изотермических задач фильтрации и переноса в

неоднородных и, возможно, анизотропных геологических средах, с применением расчетного кода (ПК) GeRa/V1 [6]. В соответствии с аттестационным паспортом ПК GeRa обеспечивает проведение прогнозных и эпигнозных расчетов гидрогеологической и гидрогеохимической обстановки на локальном или региональном масштабе.

В качестве основных отличий созданной модели от всех предшествующих отметим:

- Трехмерность и латеральная протяженность размеров модели (рис. 9). Вычисления модели проводятся на специально построенной треугольно-призматической расчетной сетке, состоящей из почти 100 тыс. ячеек. Сетка учитывает особенности геометрии геологической модели. Расчетная область модели имеет размеры: 34×25 км по поверхности, глубина — 300 м. Планируется локальное развитие модели для включения ближней зоны каждого пункта хранения в отдельности, для адекватного прогноза распространения радионуклидов в геологической среде на период потенциальной опасности.
- Учет данных по 72 глубоким скважинам (200 м), пробуренным в период с 1976—1977 годы, рассмотрены гидрологические условия территории. Модель включает 11 геологических слоев.
- Обоснование границ модели. Для определения граничных условий модели была создана региональная модель потока подземных вод на основе метода аналитических элементов [7, 8]. При определении внешних границ фильтрационной модели учитывались локальные и региональные дренажи, которые важны с точки

Рис. 9. 3D-модель дальней зоны

Рис. 10. Модельное распределение гидроизогипс

Рис. 11. Вероятное направление движения нейтрального трассера

зрения оценки областей разгрузки подземных вод. На рис. 10 приведено модельное распределение гидроизогипс, полученные результаты соответствуют гидрогеологическим условиям рассматриваемой территории.

На основе предварительных результатов расчетов было определено вероятное направление движения нейтрального трассера. Полученные результаты показывают, что основное направление распространения загрязнителя будет проходить в направлении р. Дубна, что согласуется с результатами полевых исследований и региональными представлениями о движении подземных вод на данной территории (рис. 11).

Для оценки долговременной безопасности на период до 10000 лет необходим долгосрочный климатический прогноз. В международной практике учета изменений климата принято опираться на его различные типы, формирующиеся в результате эволюции, такие как, например, ледниковый климат, климат тундры, климат пустыни и другие. Каждый тип климата имеет свои особенности, которые могут влиять на характер протекания процессов в системе, в том числе воздействовать на инженерные барьеры и упаковки, распространение радионуклидов и других компонентов отходов во вмещающей среде и выход в открытую биосферу. Таким образом, учет влияния изменения климата предполагает:

- проецирование климатических изменений в районе размещения объекта на среднесрочный и долгосрочный периоды, сопровождающееся оценкой вероятности преобразования климата к определенному типу;
- выявление климатического сценария нормальной эволюции, который характеризуется максимальной вероятностью;

- разработку сценариев для консервативных оценок — следствия климатических изменений, способных оказать наиболее существенное влияние на безопасность объекта.

Для выполнения такого рода оценок необходимо привлечение специалистов-климатологов.

6. Более сложная ситуация с формированием модели ближней зоны. Ее основные составляющие — задание параметров текущего состояния инженерных барьеров безопасности пунктов хранения РАО, а также многовариантность при задании конечного состояния объектов. Основной источник информации по состоянию барьеров — данные по загрязнению грунтовых вод в непосредственной близости к объектам. Контроль загрязнения грунтовых вод проводился на протяжении многих десятилетий, а в последние годы он трансформировался в функционирование объектного мониторинга состояния недр (ОСМН), в рамках которого готовятся регулярные годовые отчеты. В его рамках контролируются изменения химического и радионуклидного состава вследствие фильтрации жидкой фазы из хранилищ №№ 1—29 и 36 в местах нарушения целостности элементов конструкций инженерных барьеров, выполняется отбор проб воды из наблюдательных и исследовательских скважин. В некоторых случаях получаемые данные указывают на взаимосвязь метеосадков и загрязнения. Однако полноценного совместного анализа этих данных с метеоданными, в том числе с привлечением современных методов пространственной геостатистики не проводилось. В этом плане предстоит решить ряд задач по интеграции результатов ОСМН в интегральную информационную модель и анализу данных ведущегося мониторинга с целью учета выявленных корреляций при обработке модели

поведения загрязняющих веществ в ближней зоне объектов. Соответствующий опыт, в том числе наработанный на площадке ФГУП «ПО «Маяк» [9], имеется.

Предварительное ранжирование объектов по текущему состоянию барьеров безопасности для последующей углубленной проработки корректирующих мер также уже выполнено. Многовариантность технических решений по конечному состоянию каждого из объектов не составляет технической сложности, в том числе по причине их естественного ограничения общим замыслом развития площадки и разделением ее на две целостные зоны — зону захоронения РАО и зону переработки.

Создание интегральной информационной модели площадки и формирование расчетных моделей будет сопровождаться развитием:

- методологии обоснования долговременной безопасности. В ее основе — безусловные требования нормативной базы, получившей существенное развитие в последние годы [10], опыт обоснования безопасности геологического захоронения РАО [11] и непосредственные результаты экспертиз безопасности в Ростехнадзоре;
- методологии отнесения РАО к особым. В ее основе по-прежнему лежат наработки периода первичной регистрации, обобщенные в работе [12]. К настоящему времени они дополнены значительным объемом фактических данных по стоимости операций и дозам облучения персонала, с учетом работ, выполненных в 2014–2019 годах. Другим новым аспектом, который планируется применить в рамках рассмотрения стратегии развития промышленной площадки, является оценка стоимости земельного участка, на котором расположено хранилище РАО.

Заключение

Выполненные работы позволяют прогнозировать возможность эффективного решения задач выработки оптимальной долгосрочной стратегии в отношении промышленной площадки ФГУП «РАДОН» в течение ближайших двух лет. При этом уже сегодня могут быть сформулированы рекомендации по организации подобных работ на иных площадках и объектах:

1. Восстановление актуальных моделей объекта должно вестись одновременно по двум направлениям — «как спроектировано» и «как есть» с выходом на актуальную модель, обеспечивающую основу для анализа долговременной безопасности, проектирования работ по выводу

из эксплуатации или консервации объекта и мониторинга его состояния.

2. Наиболее эффективным инструментом актуализации состояния внешних конструкций объектов является лазерное сканирование, которое необходимо проводить как минимум в три этапа с анализом изменений во времени: первичное сканирование; дополнительное сканирование по проблемным зонам объектов; регулярное (с периодом 2–3 года) сканирование для задач долговременного мониторинга состояния сооружений.

3. Требуется дополнительные инструментальные обследования конструктивных элементов объектов, в качестве которых необходимо опробовать методы георадарного исследования.

4. Целесообразна ведомственная регламентация отдельных процессов и работ (лазерное сканирование, создание информационных моделей и требования к данным и атрибутам).

5. Целесообразно развитие системы мониторинга недр в части представления целостных объемов данных для их использования эксплуатирующими организациями в задачах обоснования долговременной безопасности объектов.

6. Большое количество приповерхностных объектов хранения и захоронения РАО, в том числе особых, определяют перспективность разработки расчетно-аналитических (цифровых) сервисов по вопросам оценки и обоснования долговременной безопасности приповерхностных хранилищ РАО.

Литература

1. Проблемы ядерного наследия и пути их решения. Вывод из эксплуатации / Под общ. ред. Большова Л. А., Лаверова Н. П., Линге И. И. М.: Энергопроманалитика, 2015. Т. 3. — 316 с.
2. Абрамов А. А., Дорофеев А. Н., Дерябин С. А. Развитие ЕГС РАО в рамках работ по федеральной целевой программе обеспечения ядерной и радиационной безопасности // Радиоактивные отходы. 2019. № 1 (6). С. 8–24.
3. Технологические и организационные аспекты обращения с радиоактивными отходами / Серия учебных курсов № 27. Международное агентство по атомной энергии, Вена, 2005. С. 221.
4. IAEA Technical Cooperation Project No. RER9143 «Sustaining Cradle-to-Grave Control of Radioactive Sources». TC Workshop on Methodologies for Management of RADON-type Facilities. Семинар МАГАТЭ по методологиям управления объектами типа «Радон». 25–29 ноября 2019 года, МГУ, Москва, Россия.

5. Федеральный закон от 11.07.2011 №190-ФЗ (ред. от 02.07.2013) «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (с изм. и доп., вступающими в силу с 16.07.2013).

6. Аттестационный паспорт программного средства «Программа для трехмерного геофилтратационного и геомиграционного моделирования» (GeRa/V1). Регистрационный номер 443 от 17 апреля 2018 года. Ростехнадзор.

7. *Haitjema H. M.* Modeling three-dimensional flow in confined aquifers by superposition of both two- and three-dimensional analytic functions // *Water Resour. Res.*, 1985, 21(10):1557–1556.

8. *Haitjema H. M.* Analytic Element Modeling of Groundwater Flow. Academic Press. 1995. 394 p.

9. *Савельева Е. А., Горелов М. М., Уткин С. С.* Вопросы анализа неопределенностей при прогнозировании

поведения Теченского каскада водоемов и их влияние на стратегические решения по безопасности // *Вопросы радиационной безопасности*. 2018. №4. С. 43–51.

10. *Абалкина И. Л., Большов Л. А., Капырин И. В., Линге И. И., Савельева Е. А., Свительман В. С., Уткин С. С.* Обоснование долговременной безопасности захоронения ОЯТ и РАО на 10000 и более лет: методология и современное состояние. Препринт ИБРАЭ № 2019-03. М., ИБРАЭ РАН, 2019. 40 с.

11. *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.

12. Особые радиоактивные отходы. / Под общей редакцией И. И. Линге. М.: ООО «САМполиграфист» — 2015. — 240 с.

Информация об авторах

Лужецкий Алексей Владимирович, генеральный директор, ФГУП «РАДОН» (119121, Москва, 7-й Ростовский переулок, д. 2/14), e-mail: info@radon.ru.

Невров Юрий Васильевич, эксперт отдела технической подготовки, ФГУП «РАДОН» (119121, Москва, 7-й Ростовский переулок, д. 2/14), e-mail: YVNevrov@radon.ru.

Ведерникова Марина Владимировна, кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: vmv@ibrae.ac.ru.

Иванов Артем Юрьевич, и. о. заведующего отделением, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: aivanov@ibrae.ac.ru.

Линге Иннокентий Игоревич, главный специалист, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: iil@ibrae.ac.ru.

Неуважаев Георгий Дмитриевич, младший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: neuvazhaev@ibrae.ac.ru.

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

Шпиньков Вячеслав Игоревич, руководитель проекта, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: shvi@ibrae.ac.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.

Библиографическое описание статьи

Лужецкий А. В., Невров Ю. В., Ведерникова М. В., Иванов А. Ю., Линге Ин. И., Неуважаев Г. Д., Савельева Е. А., Шпиньков В. И., Понизов А. В. О создании интегральной информационной модели для определения стратегии развития промышленного комплекса по обращению с радиоактивными отходами ФГУП «РАДОН» // *Радиоактивные отходы*. 2020. №1(10). С. 101–112. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-101-112.

DEVELOPMENT OF AN INTEGRAL DIGITAL MODEL OF FSUE “RADON” RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT FACILITY FOR STRATEGIC DECISION-MAKING

Luzhetsky A. V.¹, Nevrov Yu. V.¹, Vedernikova M. V.², Ivanov A. Yu.², Linge In. I.²,
Neuvazhaev G. D.², Saveleva E. A.², Shpinkov V. I.², Ponizov A. V.³

¹Federal State Unitary Enterprise — United Ecological, Scientific and Research Centre of Decontamination of Radioactive Waste (RAW) and Environmental Protection, Moscow, Russia

²Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia

Article received on February 12, 2020

The paper considers the current state of affairs on the development of an integral information model describing a radioactive waste management facility through the example of FSUE RADON's site. The paper provides the results of the 3D information model development based on the data of in-situ laser scanning and analysis of design documentation. Development of detailed 3D hydrogeological information model for the far field and near field is also discussed. Consideration is given to potential use of integral information models in the development of safety assessments and safety cases for radioactive waste management facilities. The paper presents promising areas for further development of the information models and measures to enhance their capabilities.

Keywords: radioactive waste, information modeling, information model, radioactive waste storage site, migration modeling, long-term safety, special radioactive waste, decommissioning.

References

1. *Problemy yadernogo naslediya i puti ih resheniya. Vывод iz ekspluatatsii* [Nuclear legacy problems and ways of their solution. Development of the system of radioactive waste management in Russia]. Edited by Bolshov L. A., Laverov N. P., Linge I. I. V. 3. Moscow, Energopromanalitika Publ., 2015, 392 p.
2. Abramov A. A., Dorofeev A. N., Deryabin S. A. Razvitie EGS RAO v ramkah rabot po federalnoy tselevoy programme obespecheniya yadernoy i radiatsionnoy bezopasnosti [Development of USS RW in the framework of Federal targeted program of nuclear and radiation safety assurance]. *Radioaktivnye othody — Radioactive Waste*, 2019, no. 1 (6), pp. 8—24.
3. Technological and organizational aspects of radioactive waste management. Series of training courses No. 27. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2005. 221 p.
4. IAEA Technical Cooperation Project No. RER9143 “Sustaining Cradle-to-Grave Control of Radioactive Sources”. TC Workshop on Methodologies for Management of RADON-type Facilities. 25—29 November 2019, Moscow State University, Moscow, Russia.
5. Federal'nyy zakon ot 11 iyulya 2011 g. № 190-FZ “Ob obrashchenii s radioaktivnymi othodami i o vnesenii izmenenij v otдел'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federacii” [Federal Law of July 11 2011 No. 190-FZ “On radioactive waste management and amendment of some acts of law of the Russian Federation”].
6. Certification passport of the software tool “Program for three-dimensional geofiltration and geomigration modeling” (GeRa/V1). No. 443 17.04.2018.
7. Haitjema H. M. Modeling three-dimensional flow in confined aquifers by superposition of both two- and three-dimensional analytic functions. *Water Resour. Res.*, 1985, 21(10):1557-1556.
8. Haitjema H. M. Analytic Element Modeling of Groundwater Flow. Academic Press. 1995. 394 p.
9. Saveleva E. A., Gorelov M. M., Utkin S. S. Voprosy analiza neopredelennostey pri prognozirovanii povedeniya Techenskogo kaskada vodoemov i ih vliyaniye na strategicheskie resheniya po bezopasnosti [Aspects of Analysis of Uncertainties When Predicting Behaviour of the Tcha Reservoir Cascade, and Their Effect On Strategic Decisions Concerning Safety]. *Voprosy radiacionnoy bezopasnosti — Radiation Safety Issues*, 2018, no. 4, pp. 43—51.
10. Abalkina I. L., Bolshov L. A., Kapyrin I. V., Linge I. I., Saveleva E. A., Svitelman V. S., Utkin S. S. *Obosnovanie dolgovremennoy bezopasnosti zakhroneniya OYAT i RAO na 10000 i bolee let: metodologiya i sovremennoe sostoyaniye* [Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel Deep Geological Disposal Long-Term Safety Assessment for 10000 Years And Over: Methodology And The Current State]. Preprint IBRAE-2019-03. Moscow: Nuclear Safety Institute Publ., 2019. 40 p.

11. Kochkin B. T. Otsenka bezopasnosti geologicheskikh hranilishch VAO i OYAT: mezhdunarodnyy opyt v prilozhenii k Eniseyskomu proektu [The Safety Assessment of Geological Repositories for HLW and SNF: Applying International Experience to the Eniseiskiy Project]. *Radioaktivnye othody — Radioactive Waste*, 2018, no. 2 (3), pp. 18–29.
12. *Osobyie radioaktivnye othody* [Special radioactive waste]. Edited by I. I. Linge. Moscow, LLC "SAM poligrafist" Publ., 2015. 240 p.

Information about the authors

Luzhetsky Aleksey Vladimirovich, General Director FSUE "RADON" (2/14, 7-th Rostovsky per., Moscow, Russia, 119121), e-mail: info@radon.ru.

Nevrov Yuriy Vasil'evich, expert of the technical training Department FSUE "RADON" (2/14, 7-th Rostovsky per., Moscow, Russia, 119121), e-mail: YVNevrov@radon.ru.

Vedernikova Marina Vladimirovna, PhD, researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya St., Moscow, 115191), e-mail: vmv@ibrae.ac.ru.

Ivanov Artem Yurievich, Head of Department, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: aivanov@ibrae.ac.ru.

Linge Innokentiy Igorevich, Senior specialist, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: iil@ibrae.ac.ru.

Neuvazhaev Georgy Dmitrievich, Junior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: gogen92@mail.ru.

Saveleva Elena Aleksandrovna, PhD, Head of Laboratory, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya St., Moscow, 115191), e-mail: esav@ibrae.ac.ru.

Shpinkov Vyacheslav Igorevich, project manager, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya St., Moscow, 115191), e-mail: shvi@ibrae.ac.ru.

Ponizov Anton Vladimirovich, Head of Office, Federal State-Funded Institution Scientific and Engineering Center of Nuclear and Radiation Safety (5, 2/8, Malaya Krasnoselskaya St., Moscow, 107140), e-mail: ponizov@secnrs.ru.

Bibliographic description

Luzhetsky A. V., Nevrov Yu. V., Vedernikova M. V., Ivanov A. Yu., Linge In. I., Neuvazhaev G. D., Savelyeva E. A., Shpinkov V. I., Ponizov A. V. Development of an integral digital model of FSUE "RADON" radioactive waste management facility for strategic decision-making. *Radioactive Waste*, 2020, no. 1 (10), pp. 101–112. (In Russian). DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-101-112.