

## РАЗВИТИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА КОРИДА И ОПЫТ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ОБРАЩЕНИЯ С ОЯТ И РАО

А. А. Аракелян, А. И. Блохин, П. А. Блохин, Ю. Е. Ванеев, С. Т. Казиева, П. А. Кизуб,  
В. Г. Кондаков, С. В. Панченко, И. В. Сипачёв

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 24 июня 2022 г.

*Представлено описание текущего состояния разработок программного комплекса КОРИДА и примеров его использования при решении задач, связанных с обращением с ОЯТ и РАО. Его функциональные возможности существенно расширены в части автоматизированной подготовки моделей для расчетов дозы облучения персонала на основе данных лазерного сканирования, а также за счет разработки модулей для оценки радиационного воздействия на население и биоту. Приведены результаты верификации и валидации модуля нуклидной кинетики и оценки доз потенциального облучения населения вблизи пункта приповерхностного захоронения РАО.*

**Ключевые слова:** обращение с ОЯТ и РАО, программный комплекс, подготовка расчетных моделей, результаты расчетов, мощность дозы облучения персонала и населения, радиоактивные отходы.

### Введение

В рамках федеральных целевых программ запланирован колоссальный объем работ для решения проблем завершающих стадий жизненного цикла (ЖЦ) объектов использования атомной энергии (ОИАЭ), в том числе переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), вывода из эксплуатации (ВЭ) объектов ядерного наследия, обращения с радиоактивными отходами (РАО). Активное развитие новых технологий в этой сфере деятельности, включая цифровые, и современные требования к обоснованию ядерной, радиационной и экологической безопасности ОИАЭ накладывают специальные условия на использование расчетных кодов на всех стадиях ЖЦ этих объектов.

Технологии создания цифровых информационных моделей и расчетные коды позволяют на предпроектной стадии ВЭ обосновывать выбор наиболее эффективных технических и организационных решений, основываясь на результатах вариантных расчетных исследований безопасности, в том числе радиационного воздействия на персонал, население и объекты окружающей среды при выполнении работ, а также в долгосрочной перспективе.

Для проведения всего комплекса оценок радиационной безопасности, включая прогнозирование радионуклидных составов облученных материалов, их радиационных характеристик и создаваемых ими дозовых полей,

разрабатывается программный комплекс (ПК) КОРИДА («Программный Комплекс для Обоснования Радиационной безопасности объектов с Источниками ионизирующего излучения, Дозовый Аспект»). Информация о его структуре и функциональных возможностях на первом этапе его создания приведена в работе [1].

Дальнейшее развитие комплекса проводилось в следующих направлениях:

- верификация и валидация программы TRACT [2], предназначенной для расчетов радионуклидных составов и радиационных характеристик ОЯТ и РАО (выходы альфа- и бета-частиц, выходы и спектры нейтронного и гамма-излучений, энерговыделение, активность, газообразование);
- развитие возможностей графического редактора по импорту моделей объектов из системы автоматизированного проектирования (САПР), например, Revit [3];
- разработка модулей для оценки доз облучения населения при различных видах водопользования и отдельных видов биоты;
- разработка модуля расчета допустимых сбросов радиоактивных веществ в поверхностные водоемы.

В данной статье представлено описание текущего состояния разработки ПК КОРИДА и приведены примеры его использования при решении некоторых задач, связанных с обращением с ОЯТ и РАО.

### Верификация и валидация программы TRACT

Программа нуклидной кинетики TRACT позволяет моделировать изменения радионуклидного состава и радиационных характеристик ОЯТ и РАО в результате радиоактивного распада нестабильных изотопов и ядерных реакций при нейтронном облучении в области энергий нейтронов до 20 МэВ.

Верификация и валидация программы TRACT проводилась на основе матрицы верификации (табл. 1), содержащей расчетные и экспериментальные данные по радионуклидному составу, активности, остаточному тепловыделению ОЯТ реакторов ВВЭР-440, -1000, -1200 и выходам гамма-излучения из металлических материалов, облученных в реакторе БР-10.

Результаты расчетов по тестовым задачам из матрицы верификации были ранее опубликованы в работах [10–12]. В качестве одного из примеров валидации программы на рис. 1

Таблица 1. Матрица верификации программы TRACT

Назначение эксперимента / расчетного исследования	Источник излучения (выгорание)	Материал
Определение активности и $\alpha$ -, $\beta$ -, $\gamma$ -энерговыделения [4]	Реактор ВВЭР-440 (29,5 ГВт-сут/тU)	Диоксид урана, обогащение – 3,6 %
	Реактор ВВЭР-1000 (40,5 ГВт-сут/тU)	Диоксид урана, обогащение – 4,4 %
Определение остаточного тепловыделения (РБ-093-20) [5]	Реактор ВВЭР-440 (30 ГВт-сут/тU)	Диоксид урана, обогащение – 3,6–4,87 %
	Реактор ВВЭР-1000 (40 ГВт-сут/тU)	Диоксид урана, обогащение – 3–4,95 %
	Реактор ВВЭР-1200 (50 ГВт-сут/тU)	Диоксид урана, обогащение – 3,3–4,95 %
Измерения остаточного тепловыделения продуктов деления [6]	Реактор (тепловые нейтроны)	$^{239}\text{Pu}$ , $^{233}\text{U}$ , $^{235}\text{U}$
Измерения спектров гамма-излучения облученных образцов [7]	Реактор БР-10	V, V-Ti, V-Ti-Cr, V-Fe, Nb, Mo, Re, W
Измерения массовых содержаний актинидов и продуктов деления [8–9]	Реактор ВВЭР-440	Диоксид урана, обогащение – 3,6 %
	Реактор ВВЭР-1000	Диоксид урана, обогащение – 3,6 % и 4,4 %

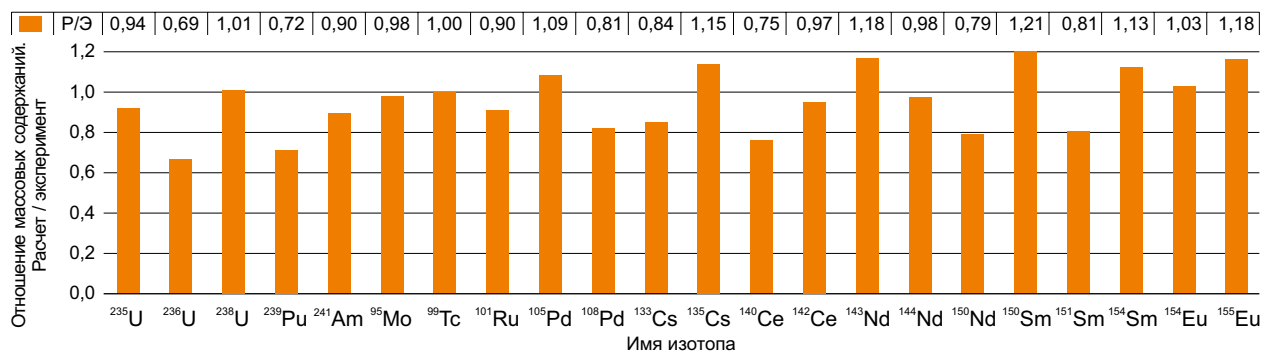


Рис. 1. Сравнение массовых содержаний актинидов и продуктов деления в образце при выгорании топлива 31,9 ГВт-сут/тU<sub>исх</sub>

представлены результаты сравнения массовых содержаний актинидов и продуктов деления в образце топлива из ОТВС ВВЭР-440 с выгоранием 31,9 ГВт-сут/ $tU_{исх}$  в виде отношения «расчет/эксперимент» [8, 12].

Сравнение расчетных и экспериментальных данных в целом показало адекватность моделирования рассматриваемых физических процессов; для большинства изотопов значения отношения «расчет/эксперимент» находятся в интервале  $0,69 \div 1,21$ . Выявленные отклонения результатов связаны с погрешностями измерений, неопределенностями исходных данных для расчетов, а также с погрешностями ядерных данных для минорных актинидов. При дальнейшем развитии программы планируется реализовать алгоритмы оценки влияния неопределенностей исходных данных на результаты расчетов.

Работы по верификации и валидации программы TRACT завершены в 2021 году, подготовлен отчет и сформирован пакет документов для аттестации программы в составе ПК КОРИДА.

### Развитие графического редактора

Одной из особенностей комплекса КОРИДА является наличие в его составе графического редактора GRATOR [13] для создания трехмерных графических моделей объектов и преобразования первичной информации (о геометрии, источниках излучения, материалах) в формат файла исходных данных для расчетных модулей.

Этот редактор позволяет импортировать модели объектов в формате step, создаваемых в САПР в виде набора тел-примитивов, редактировать их, создавать новые графические модели, конвертировать данные по геометрии, материалам и источникам излучений в формат файла исходных данных для программы TDMCC [14], визуализировать результаты расчетов, совмещая их с графической моделью. В новой версии

редактора реализована дополнительная возможность импортировать геометрические параметры фрагментов из цифровой информационной модели объекта, созданной в среде Revit на основе данных лазерного сканирования.

Сканирование промышленных объектов с применением современных лазерных технологий обеспечивает оперативность и точность получения данных о геометрии объектов (габаритные размеры, ориентация, координаты размещения). Особую значимость эта технология приобретает при обследовании ОИАЭ на завершающих стадиях жизненного цикла, когда реальное состояние объекта может существенно отличаться от проекта и время обследования силами персонала ограничивается в соответствии с уровнем радиационного фона.

Первичные данные лазерного сканирования (ЛС) (например, помещения с оборудованием) в виде «облака точек» (рис. 2а) оцифровываются специализированным программным обеспечением в среде Revit (рис. 2б, этап 1). Эту модель дополняют характеристиками материалов и источников излучения (радионуклидный состав и геометрические параметры) и экспортируют в формат "ifc". Новые возможности редактора GRATOR позволяют импортировать такую модель, включая все заданные характеристики (рис. 2в). В дальнейшем у пользователя есть возможность настроить модель под конкретную задачу оценки радиационной безопасности, сформировать расчетную модель в формате программы TDMCC и выполнить расчет.

При обосновании проектов ВЭ необходимо оценивать потенциальные дозы облучения персонала при планировании демонтажных работ. Программный комплекс КОРИДА позволяет получать пространственные распределения мощности эффективной (эквивалентной) дозы (МЭД) излучения на каждом этапе демонтажа и вычислять дозу облучения персонала с учетом сценария его

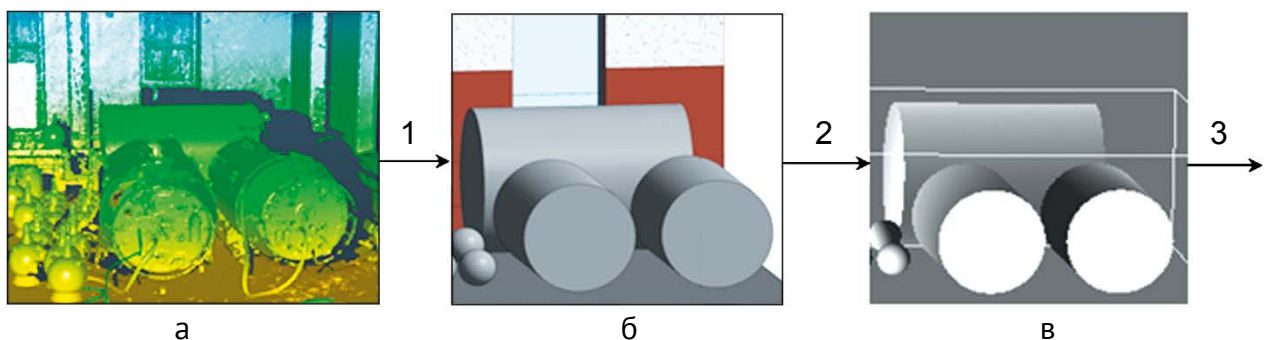


Рис. 2. Виды моделей помещения с оборудованием на этапах 1, 2 их преобразований:  
а) «облако точек» от ЛС; б) оцифрованная модель в среде Revit; в) модель в среде GRATOR;  
3 – этап конвертации в расчетную модель

перемещения. Ниже приведен пример разработки расчетной модели фрагмента объекта с аппаратом химической переработки ОЯТ для решения средствами ПК указанной задачи.

В соответствии с проектом ВЭ, в помещениях этого объекта проводятся дезактивация и демонтаж оборудования с последующей их фрагментацией и упаковкой образующихся отходов в оборотные контейнеры. В частности, предусмотрено извлечение аппаратов химической технологии из бетонных каньонов с перемещением на участок фрагментации крупногабаритного оборудования. С целью оценки дозовых нагрузок для персонала на всех этапах этого процесса, перед началом работ необходимо спрогнозировать радиационную обстановку около загрязненных радионуклидами аппаратов.

С использованием редактора GRATOR разработаны расчетные модели каньона с аппаратом до и после демонтажа верхнего перекрытия, а также модель извлеченного аппарата в монтажном зале. Удельные активности основного дозообразующего изотопа  $^{137}\text{Cs}$  ( $^{137\text{m}}\text{Ba}$ ) на поверхности каньона и на внешней поверхности аппарата заданы в соответствии с результатами комплексного инженерно-радиационного обследования объекта (КИРО). На рис. 3 приведены

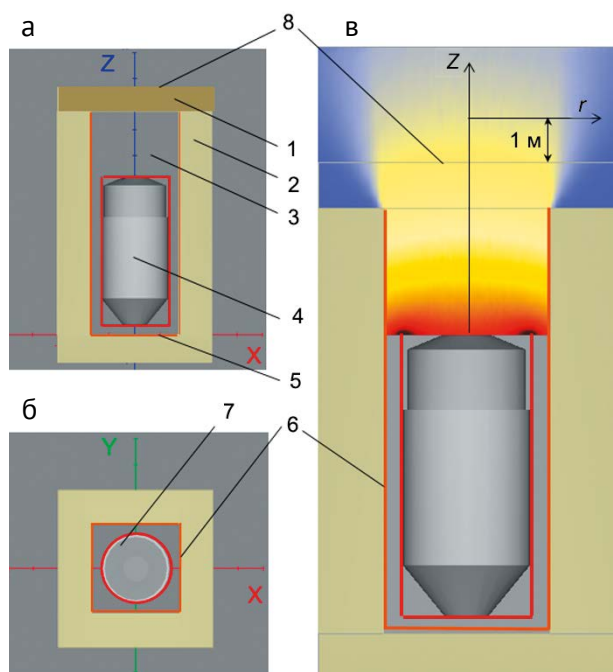


Рис. 3. Продольное (а) и поперечное (б) сечения расчетной модели аппарата в бетонном каньоне: 1 – верхнее перекрытие; 2 – стены каньона; 3 – воздух; 4 – аппарат; 5, 6 – модели поверхностных источников излучения на дне и стенах каньона, 7 – модель поверхностного цилиндрического источника излучения, 8 – верхний уровень плиты перекрытия; в – изображение поля МЭД над аппаратом без верхнего перекрытия

сечения графической модели аппарата в каньоне и изображение полученного в результате расчета поля МЭД над ним после демонтажа верхнего перекрытия.

Получаемые с использованием ПК КОРИДА результаты расчетов пространственных распределений МЭД около аппаратов достаточны для прогнозирования радиационной обстановки в помещениях на всех этапах проведения демонтажных работ.

Следует отметить, что выполнение подобных расчетов зачастую осложняется недостаточностью результатов (и/или их неудовлетворительной точностью), получаемых при проведении КИРО, что может приводить к существенным погрешностям, например, в нормировке результатов расчетов на мощность источников излучения. Для формирования требований к проведению обследования с целью улучшения его качества разрабатывается расчетно-аналитический подход, основанный на вариантных расчетах поля МЭД и решениях обратной задачи (восстановление активности источников при фиксированных значениях МЭД). Описание такого подхода и результаты его апробации представлены в [15].

### Модули семейства Экорад

В состав ПК КОРИДА включены три новых модуля: Экорад-ДС, Экорад-Аква и Экорад-Биота.

Модуль Экорад-ДС предназначен для расчетов величины допустимого сброса радиоактивных веществ в поверхностные водоемы при нормальной эксплуатации ОИАЭ. Расчеты основаны на «Методике разработки нормативов допустимых сбросов радиоактивных веществ в водные объекты для водопользователей» [16] и на руководствах по безопасности при использовании атомной энергии РБ-126-17 [17] и РБ-126-21 [18].

Модуль Экорад-Аква предназначен для оценки доз облучения населения при потенциальном воздействии радиационного фактора в задачах обоснования радиационной безопасности ОИАЭ, в том числе в долгосрочной перспективе для пунктов захоронения РАО. Модуль позволяет проводить оценки для сценариев текущего и ретроспективного радиационного загрязнения, основанием для которых служат данные мониторинга содержания радионуклидов в водной среде, а также для прогнозных сценариев поступления радиоактивных веществ в водные объекты. В реализованных моделях дозовые нагрузки на население формируются по различным путям воздействия (рис. 4):

- внешнее облучение в результате пребывания в зоне водопользования (нахождение в воде,

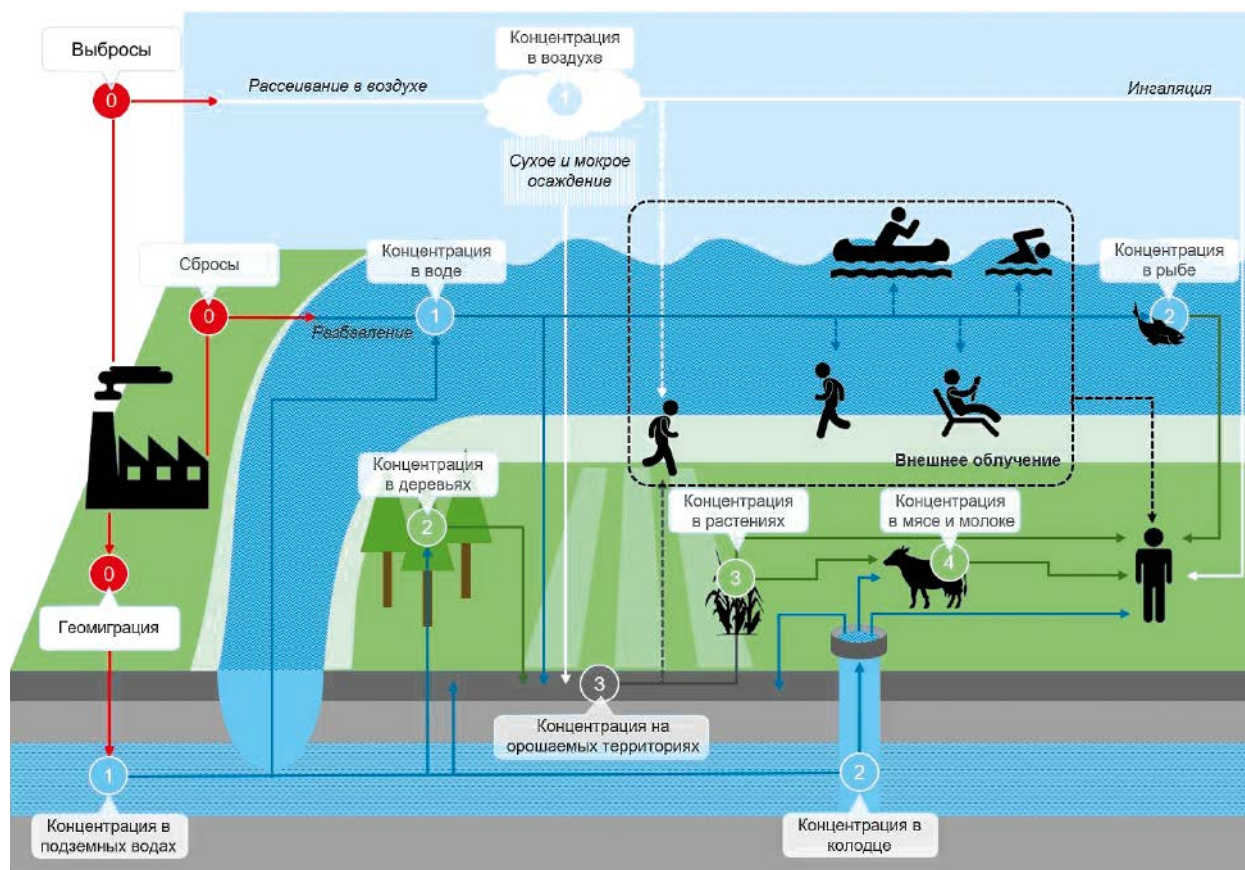


Рис. 4. Общая схема путей миграции радионуклидов в окружающей среде и облучения человека в результате деятельности ОИАЭ

пребывание на плавсредствах, пляже, орошаемых территориях, заливных лугах);

- внутреннее облучение за счет потребления питьевой воды, рыбы, а также растительной и мясомолочной продукции, произведенной на орошаемых территориях, а также за счет ингаляционного поступления радионуклидов.

На рис. 5, в качестве примера возможностей программы, приведены результаты оценки доз облучения населения при обосновании долговременной безопасности пункта приповерхностного захоронения РАО (ППЗРО). В модели рассматривается вариант размещения РАО навалом в подземной части здания (по рассматриваемому сценарию в будущем оно должно стать ППЗРО). Отходы представляют собой измельченные строительные материалы: бетон, кирпич и радиоактивно загрязненный грунт. В качестве начальных условий массопереноса суммарная активность каждого из рассматриваемых радионуклидов во всем ППЗРО принималась равной  $1 \cdot 10^{10}$  Бк.

Для проведения расчетов по оценке доз входные данные по содержанию радионуклидов в подземных водах предварительно получены с помощью геомиграционного моделирования, выполненного с использованием кода GeRa [19].

В качестве критической в примере выбрана группа населения, осуществляющая фермерскую деятельность в непосредственной близости к ППЗРО и потребляющая произведенные на данной территории продукты питания и питьевую воду из местных колодцев. Среди возрастных групп выбрано взрослое население.

Рассмотрен сценарий поступления радионуклидов, содержащихся в РАО, в подземные воды после консервации типового ППЗРО во временном периоде, в котором значения удельной активности радионуклидов в воде в местах водопользования достигли своего пика и прошли его, а уровни содержания накопленных радионуклидов в почве поливаемых сельскохозяйственных угодий достигли равновесных значений. При этом трансурановые элементы, обладающие значительно более высокой сорбируемостью, мигрировали лишь в пределах ближней зоны ППЗРО.

Модуль Экорад-Биота предназначен для расчетов доз облучения характерных для данного региона видов биоты за счет равновесного загрязнения компонентов природной среды. Получаемые результаты в дальнейшем могут служить основой для оценки возможного ущерба в случае, когда наносится вред биоте [20, 21] или

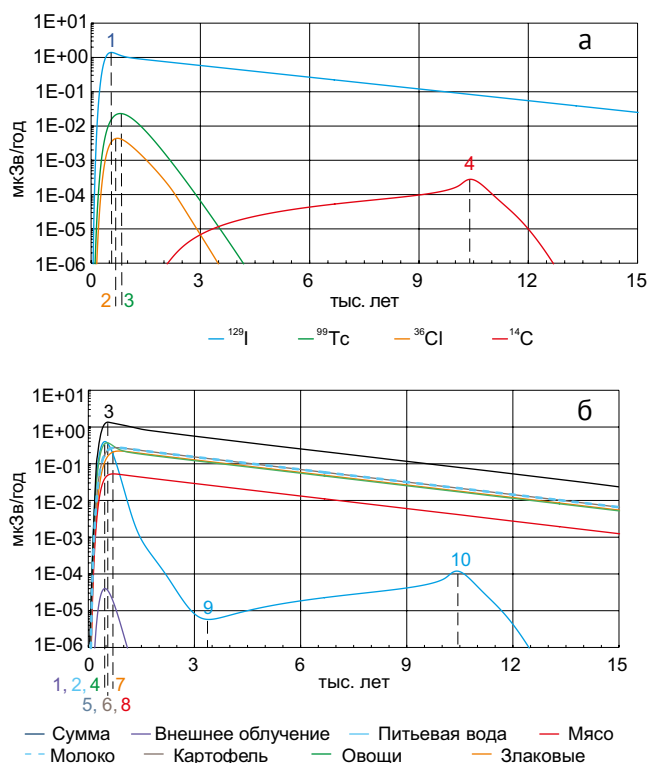


Рис. 5. Пример расчета в модуле Экорад-Аква динамики мощности доз облучения человека в течение его жизни а) в результате потенциального воздействия присутствующих в ППЗРО разных радионуклидов (пунктиром: максимум дозы в момент пика удельной активности в подземных водах: 1 –  $^{129}\text{I}$ , 2 –  $^{36}\text{Cl}$ , 3 –  $^{99}\text{Tc}$ , 4 –  $^{14}\text{C}$ ) б) для различных путей облучения (пунктиром: максимум дозы в момент пика активности в подземных водах: 1, 2, 4 –  $^{129}\text{I}$ ; 5, 6, 8 –  $^{36}\text{Cl}$ ; 7 –  $^{99}\text{Tc}$ ; 10 –  $^{14}\text{C}$ , 9 – локальный минимум в начале роста удельной активности  $^{14}\text{C}$  и на спаде  $^{36}\text{Cl}$  и  $^{99}\text{Tc}$ , 3 – абсолютный максимум дозы облучения от всех путей поступления)

превышены установленные государством нормативы по использованию природных ресурсов.

Для оценки экономического ущерба разрабатывается модуль Экорад-Ущерб, в котором реализована разработанная в ИБРАЭ РАН методика на основе соответствующих постановлений Правительства Российской Федерации и Лесохозяйственных регламентов рассматриваемых регионов. После тестирования этого модуля он также будет включен в состав ПК КОРИДА.

### Заключение

В данной работе представлены результаты развития ПК КОРИДА и примеры его использования для:

- расчетов радиационных характеристик ОЯТ и РАО в тестовых задачах из матрицы верификации программы TRACT;
- автоматизированной подготовки трехмерных расчетных моделей радиационно опасного объекта на основе данных лазерного сканирования;

• прогнозирования радиационной обстановки на ОИАЭ с целью минимизации дозовой нагрузки на персонал при демонтажных работах. Существенно расширены функциональные возможности комплекса за счет включения в него модулей семейства Экорад для оценки возможного воздействия ионизирующего излучения на население и биоту.

При дальнейшем развитии программного комплекса предусмотрено расширение возможностей графического редактора и семейства модулей Экорад, реализация алгоритмов учета погрешностей ядерно-физических данных и оценки чувствительности результатов расчетов к неопределенности исходных данных. Разрабатывается модуль оперативной оценки мощности дозы на основе формализма факторов накопления с возможностью оценки погрешностей приближенных расчетов. Реализуется перевод комплекса на кросс-платформенный интерфейс.

### Литература

1. Блохин А. И., Блохин П. А., Ванев Ю. Е., Сипачев И. В. Программный комплекс КОРИДА для прогнозирования радиационных полей с учетом изменений характеристик источников излучений и инженерных барьеров безопасности // ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов. 2019. Вып.4. С. 78–86.
2. Блохин А. И., Блохин П. А., Сипачев И. В. Возможности расчетного кода TRACT для решения задач характеристики радионуклидного состава РАО и ОЯТ // Радиоактивные отходы. 2018. № 2 (3). С. 95–104.
3. Официальный сайт в сети интернет. Revit — URL: <https://www.autodesk.ru/products/revit.html>.
4. Колобашкин В. М., Рубцов П. М., Ружанский П. А., Сидоренко В. Д. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива: Справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1983. 382 с.
5. Радиационные и теплофизические характеристики отработавшего ядерного топлива водородных энергетических реакторов и реакторов большой мощности канальных: утв. Приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 11 марта 2020 г. № 106.
6. Yarnell J. L., Bendt Ph. J. Calorimetric Fission Product Decay Heat Measurements for  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{235}\text{U}$ , and  $^{235}\text{U}$ . Prepared for Office of Nuclear Regulatory Research US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC 20555, Report NUREG/CR-0349 (LA-7452-MS Informal Report), 1978.
7. Блохин А. И. и др. Измерения гамма-излучения образцов конструкционных материалов в

- нейтронных полях реактора БР-10 // ВАНТ, сер. Материаловедение и новые материалы. 2016. №4(87). С. 13—33.
8. *Jardine L. J.* Radiochemical Assays of Irradiated WWER-440 Fuel for Use in Spent Fuel Burn-up Credit Activities. Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-TR-212202, April 26, 2005.
9. *Murphy B. D., Kravchenko J., Lazarenko A., Pavlovitchev A., Sidorenko V., Chetverikov A.* Simulation of Low-Enriched Uranium (LEU) Burnup in Russian VVER Reactors with the HELIOS Code Package. Report ORNL/TM-1999/168, March 2000.
10. *Блохин П. А., Блохин А. И., Сипачёв И. В.* Разработка и верификация кода нуклидной кинетики TRACT // Сб. статей по материалам международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность—2018» / Под ред. Л. И. Лукиной, Н. А. Бежина, Н. В. Ляминой. 2018. С. 189—193.
11. *Блохин А. И., Блохин П. А., Казиева С. Т.* Кросс-верификация и валидация программы TRACT на основе экспериментальных данных реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 // Материалы XI Российской научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях», Москва, 26—29 октября 2021 г. Том 3. С. 118—126.
12. *Блохин П. А., Казиева С. Т.* Верификация программы по нуклидной кинетике TRACT // Материалы XXI Школы молодых ученых ИБРАЭ РАН «Безопасность и риски в энергетике». Москва, 21—22 апреля 2022 г.
13. *Блохин П. А., Ванев Ю. Е., Сипачёв И. В.* Специализированный графический редактор для разработки трехмерных моделей ЯРОО и конвертации геометрических параметров в формат монте-карловских программ : Препринт № ИБРАЭ-2018-05. — М. : ИБРАЭ РАН, 2018. 11 с.
14. *Житник А. К., Рослов В. И., Семенова Т. В. и др.* Программа TDMCC (Time Dependent Monte Carlo Code). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010614412 от 07.07.2010.
15. *Кизуб П. А., Савельева Е. А., Блохин П. А., Самойлов А. А.* Уточнение программы КИРО объектов ядерного наследия на основе нейтронно-физических расчетов в условиях неопределенностей // Материалы XI Российской научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях», Москва, 26—29 октября 2021 г. Том 3. С. 127—134.
16. Методика разработки нормативов допустимых сбросов радиоактивных веществ в водные объекты для водопользователей. Приказ Ростехнадзора от 22 декабря 2016 г. № 551.
17. РБ-126-17. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендуемые методы расчета параметров, необходимых для разработки нормативов допустимых сбросов радиоактивных веществ в водные объекты». Приказ Ростехнадзора от 25 июля 2017 г. № 281.
18. РБ-126-21. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендуемые методы расчета параметров, необходимых для разработки нормативов допустимых сбросов радиоактивных веществ в водные объекты». Приказ Ростехнадзора от 9 сентября 2021 г. № 297.
19. *Капырин И. В.* Расчетные коды для гидрогеологического моделирования в задачах оценки безопасности ОИАЭ // Радиоактивные отходы. 2022. № 2 (19). С. 105—115.
20. *Абалкина И. Л., Барчуков В. Г., Бочкарев В. В., Ведерникова М. В., Дорогов В. И., Кочетков О. А., Крышев И. И., Линге И. И., Панченко С. В., Савкин М. Н., Уткин С. С.* Научно-техническое пособие по подготовке обосновывающих материалов для принятия решения об отнесении радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам. Версия 2.0 / Под общей ред. Линге И. И. — М. : ИБРАЭ РАН, 2014. 157 с.
21. *Линге И. И., Крышев И. И., Курьндина Л. А., Сазыкина Т. Г., Ведерникова М. В., Уткин С. С., Мокров Ю. Г.* Оценка ущерба от радиационного воздействия на окружающую среду в районе расположения водоёма Карачай // Вопросы радиационной безопасности. 2014. № 2. С. 34—42.

## Информация об авторах

*Аракелян Арам Айкович*, научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: arakelyan@ibrae.ac.ru.

*Блохин Анатолий Иванович*, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: bai@ibrae.ac.ru.

*Блохин Павел Анатольевич*, кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: blokhin@ibrae.ac.ru.

Ванеев Юрий Евгеньевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: yuvan@ibrae.ac.ru.

Казиева Сабина Темергалиевна, младший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: kazieva@ibrae.ac.ru.

Кизуб Полина Александровна, младший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: kizub@ibrae.ac.ru.

Кондаков Василий Гаврильевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: kondakov@ibrae.ac.ru.

Панченко Сергей Владимирович, заведующий лабораторией, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: panch@ibrae.ac.ru.

Сипачёв Иван Васильевич, главный специалист, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: ivanushka1976@list.ru.

### Библиографическое описание статьи

Аракелян А. А., Блохин А. И., Блохин П. А., Ванеев Ю. Е., Казиева С. Т., Кизуб П. А., Кондаков В. Г., Панченко С. В., Сипачёв И. В. Развитие программного комплекса КОРИДА и опыт его применения при решении задач обращения с ОЯТ и РАО // Радиоактивные отходы. 2022. № 3 (20). С. 107–116. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-107-116.

---

## REFINEMENT OF KORIDA SOFTWARE COMPLEX AND ITS APPLICATION IN ADDRESSING SNF AND RW MANAGEMENT PROBLEMS

Arakelyan A. A., Blohin A. I., Blohin P. A., Vaneev Yu. E., Kazieva S. T., Kizub P. A., Kondakov V. G., Panchenko S. V., Sipachev I. V.

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

Article received on June 24, 2022

*The paper overviews current progress in the development of the KORIDA software and some examples of its application providing solution to RW and SNF management problems. Its functional capacity has been greatly extended, in particular, providing automated development of models required to calculate exposure doses to personnel based on laser scanning data, as well as through the development of modules evaluating exposure impact on the population and biota. The paper also presents the results of nuclide kinetics module verification and validation, evaluated doses of potential exposure for the population in the vicinity of a near-surface RW disposal facility.*

**Keywords:** SNF and RW management, software complex, development of calculation models, calculation results, exposure dose rate for personnel and the public, radioactive waste.

### References

1. Blokhin A. I., Blokhin P. A., Vaneev Yu. E., Sipachev I. V. Programmnyy kompleks KORIDA dlya prognozirovaniya radiatsionnykh poley s uchetom izmeneniy kharakteristik istochnikov izlucheniya i inzhenernykh bar'yerov bezopasnosti [Korida

software package designed for radiation field forecasting taking into account changes in the characteristics of radiation sources and engineered safety barriers]. VANT, Ser. Matematicheskoye modelirovaniye fizicheskikh protsessov — VANT, Mathematical modeling of physical processes, 2019, Issue 4, pp. 78–86.



2. Blokhin A. I., Blokhin P. A., Sipachev I. V. Vozmozhnosti raschetnogo koda TRACT dlya resheniya zadach kharakterizatsii radionuklidnogo sostava RAO i OYAT [Capabilities code TRACT to solve problems of characterization radioactive waste and spent fuel]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2018, № 2 (3), pp. 95–104.
3. Official internet website. Revit — URL: <https://www.autodesk.ru/products/revit.html>.
4. Kolobashkin V. M., Rubtsov P. M., Ruzhanskiy P. A., Sidorenko V. D. *Radiatsionnyye kharakteristiki obluchennogo yadernogo topliva: Spravochnik* [Radiation Characteristics of Irradiated Nuclear Fuel: Handbook]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 382 p.
5. *Radiatsionnye i teplofizicheskie kharakteristiki otrabotavshogo yadernogo topliva vodo-vodyanykh ehnergeticheskikh reaktorov i reaktorov bol'shoi moshchnosti kanal'nykh* [Radiation and thermophysical characteristics of spent nuclear fuel of water-cooled power reactors and high-power channel reactors: approved]. Order of the Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision of March 11, 2020 No. 106.
6. Yarnell J. L., Bendt Ph. J. *Calorimetric Fission Product Decay Heat Measurements for  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{233}\text{U}$ , and  $^{235}\text{U}$* . Prepared for Office of Nuclear Regulatory Research US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC 20555, Report NUREG/CR-0349 (LA-7452-MS Informal Report), 1978.
7. Blokhin A. I. et al. Izmereniya gamma-izlucheniya obraztsov konstruktsionnykh materialov v neytronnykh polyakh reaktora BR-10 [Measurements of gamma radiation from samples of structural materials in the neutron fields of the BR-10 reactor]. *VANT, ser. Materialovedenie i novye materialy — VANT, ser. Material science and new materials*, 2016, no. 4 (87), pp. 13–33.
8. Jardine L. J. *Radiochemical Assays of Irradiated WVER-440 Fuel for Use in Spent Fuel Burn-up Credit Activities*. Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-TR-212202, April 26, 2005.
9. Murphy B. D., Kravchenko J., Lazarenko A., Pavlovitchev A., Sidorenko V., Chetverikov A. *Simulation of Low-Enriched Uranium (LEU) Burnup in Russian VVER Reactors with the HELIOS Code Package*. Report ORNL/TM-1999/168, March 2000.
10. Blokhin P. A., Blokhin A. I., Sipachov I. V. Razrabotka i verifikatsiya koda nuklidnoy kinetiki TRACT [Development and verification of the nuclide kinetics TRACT code]. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference Environmental, Industrial and Energy Safety* — 2018. Edt. by L. I. Lukina, N. A. Bezhin, N. V. Lyamina. 2018. Pp. 189–193.
11. Blokhin A. I., Blokhin P. A., Kaziyeva S. T. Kross-verifikatsiya i validatsiya programmy TRACT na osnove eksperimental'nykh dannyykh reaktorov VVER-440 i VVER-1000 [Cross-verification and validation of the TRACT software based on the experimental data from VVER-440 and VVER-1000 reactors]. *Proceedings of the XI Russian Scientific Conference Radiation Protection and Radiation Safety in Nuclear Technologies*. Moscow, October 26–29, 2021, vol. 3, pp. 118–126.
12. Blokhin P. A., Kaziyeva S. T. Verifikatsiya programmy po nuklidnoy kinetike TRACT [Verification of the nuclide kinetics TRACT software]. *Proceedings of the XXI School of Young Scientists Sponsored by the Nuclear Safety Institute of RAS. Safety and Risks in the Energy Sector*. Moscow, April 21–22, 2022.
13. Blokhin P. A., Vaneyev Yu. E., Sipachov I. V. *Spetsializirovannyi graficheskiy redaktor dlya razrabotki trekhmernykh modeley YAROO i konvertatsii geometricheskikh parametrov v format monte-karlovskikh programm* [Purpose-developed graphical editor providing the development of 3D models for nuclear facilities and converting geometric parameters into Monte Carlo software format]. Preprint no. IBRAE-2018-05. — Moscow, IBRAE RAN Publ., 2018. 11 p.
14. Zhitnik A. K., Roslov V. I., Semenova T. V. et al. *Programma TDMCC (Time Dependent Monte Carlo Code)*. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM* [TDMCC (Time Dependent Monte Carlo Code) software program. Certificate of state software registration] № 2010614412 of July 7, 2010.
15. Kizub P. A., Savel'eva E. A., Blokhin P. A., Samoilov A. A. Utochneniye programmy KIRO ob"yektov yadernogo naslediya na osnove neytronno-fizicheskikh raschetov v usloviyakh neopredelennostey [Refinement of the KIRO program for nuclear legacy facilities based on neutronic calculations performed under uncertainty conditions]. *Proceedings of the XI Russian Scientific Conference Radiation Protection and Radiation Safety in Nuclear Technologies*. Moscow, October 26–29, 2021, vol. 3, pp. 127–134.
16. *Metodika razrabotki normativov dopustimyykh sbrosov radioaktivnykh veshchestv v vodnyye ob"yekty dlya vodopol'zovateley* [Methodology for the development of standards for permissible discharges of radioactive substances into water bodies for water users]. Order of Rostekhnadzor of December 22, 2016. № 551.
17. RB-126-17. *Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoy energii "Rekomenduyemye metody rascheta parametrov, neobkhodimyykh dlya razrabotki normativov dopustimyykh sbrosov radioaktivnykh veshchestv v vodnyye ob"yekty"* [Safety Guidelines for Atomic Energy Use. Recommended Methods Used to Calculate Parameters Required for the Development of Standards for Permissible Discharges of Radioactive Substances into Water Bodies]. Order of Rostekhnadzor of July 25, 2017, no. 281.

18. RB-126-21. *Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoy energii "Rekomenduyemye metody rascheta parametrov, neobkhodimyykh dlya razrabotki normativov dopustimyykh sbrosov radioaktivnykh veshchestv v vodnyye ob'yekty"* [Safety Guidelines for Atomic Energy Use Recommended Methods Used to Calculate Parameters Required for the Development of Standards for Permissible Discharges of Radioactive Substances into Water Bodies]. Order of Rostekhnadzor of September 9, 2021, no. 297.
19. Kapyrin I. V. Raschetnye kody dlya gidrogeologicheskogo modelirovaniya v zadachah ocenki bezopasnosti OIAE [Computational Codes for the Hydrogeological Modeling within the Safety Assessment of Nuclear Facilities]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2022, no. 2 (19), pp. 105-118. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-105-118.
20. Abalkina I. L., Barchukov V. G., Bochkarev V. V., Vedernikova M. V., Dorogov V. I., Kochetkov O. A., Kryshev I. I., Linge I. I., Panchenko S. V., Savkin M. N., Utkin S. S. Under gen. ed. of Linge I. I. *Nauchno-tekhnicheskoye posobiye po podgotovke obosnovyvyayushchikh materialov dlya prinyatiya resheniya ob otneseni radioaktivnykh otkhodov k osobym radioaktivnym otkhodam. Versiya 2.0* [Scientific and technical manual on the development of materials substantiating decisions on radioactive waste categorization as special radioactive waste]. Moscow, IBRAE RAN Publ., 2014. 157 p.
21. Linge I. I., Kryshev I. I., Kuryndina L. A., Sazykina T. G., Vedernikova M. V., Utkin S. S., Mokrov Yu. G. Otsenka ushcherba ot radiatsionnogo vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu v rayone raspolozheniya vodoyoma Karachay [Assessment of environmental damage caused by the radiation impact in the area of the Karachay reservoir]. *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti — Radiation Safety Issues*, 2014, no. 2, pp. 34—42.

---

### Information about the author

*Arakelyan Aram Ajkovich*, Research Associate, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: arakelyan@ibrae.ac.ru.

*Blokhin Anatoly Ivanovich*, PhD, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: bai@ibrae.ac.ru.

*Blokhin Pavel Anatolievich*, PhD, Head of laboratory, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: blokhin@ibrae.ac.ru.

*Vaneev Yuri Evgenievich*, Doctor of Science, Senior Researcher Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: yuvan@ibrae.ac.ru.

*Kazieva Sabina Temergalievna*, Junior Research Associate, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: kazieva@ibrae.ac.ru.

*Kizub Polina Alexandrovna*, Junior Research Associate, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: kizub@ibrae.ac.ru.

*Kondakov Vasily Gavrilovich*, PhD, Senior Researcher Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: kondakov@ibrae.ac.ru.

*Panchenko Sergey Vladimirovich*, Head of laboratory, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: panch@ibrae.ac.ru.

*Sipachev Ivan Vasil'evich*, Chief Specialist, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: ivanushka1976@list.ru.

### Bibliographic description

Arakelyan A. A., Blohin A. I., Blohin P. A., Vaneev Yu. E., Kazieva S. T., Kizub P. A., Kondakov V. G., Panchenko S. V., Sipachev I. V. Refinement of KORIDA software complex and its application in addressing SNF and RW management problems. *Radioactive Waste*, 2022, no. 3 (20), pp. 107—116. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-107-116. (In Russian).