

**К.А. Чижев¹, А.В. Симаков¹, И. Сзоке², И.К. Мазур¹, Н.К. Марк²,
И.Д. Кудрин¹, Н.К. Шандала¹, А.Н. Краснощёков³, А.С. Косников³,
И.А. Кемский⁴, М. Сневе⁵, Г. Смит⁶, В.П. Крючков¹**

ВИРТУАЛЬНАЯ РЕАЛЬНОСТЬ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ КУЛЬТУРЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОБРАЩЕНИИ С ИСТОЧНИКАМИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**K.A. Chizhov¹, A.V. Simakov¹, I. Szöke², I.K. Mazur¹, N.K. Mark²,
I.D. Kudrin¹, N.K. Shandala¹, A.N. Krasnoschekov³, A.S. Kosnikov³,
I.A. Kemskey⁴, M.K. Sneve⁵, G.M. Smith⁶, V.P. Kryuchkov¹**

3D Simulation as a Tool for Improving Safety Culture during the Remediation Work with Ionizing Radiation Sources

РЕФЕРАТ

Цель: Повышение культуры безопасности персонала отделения «Губа Андреева» Северо-Западного центра по обращению с радиоактивными отходами «СевРАО» — филиала ФГУП «Предприятие по обращению с радиоактивными отходами «РосРАО» (СЗЦ «СевРАО») при обращении с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) и радиоактивными отходами (РАО) путём использования компьютерных программ с возможностью динамического трёхмерного моделирования.

Материал и методы: СЗЦ «СевРАО» является временным хранилищем отработавшего топлива (ОЯТ) и радиоактивных отходов, образовавшихся в результате эксплуатации атомного подводного и ледокольного флотов. Согласно экспертной оценке, СЗЦ «СевРАО» — это один из самых радиационно-опасных объектов северо-запада России. На данный момент идёт экологическая реабилитация площадки объекта при поддержке международных программ сотрудничества. Одной из основных частей этой работы стал внедренный на СЗЦ «СевРАО» комплекс компьютерных программ, позволяющий динамически визуализировать радиационную обстановку на виртуальной 3D-модели территории и помещений объекта, а также прогнозировать дозовые нагрузки персонала.

Результаты: Созданный комплекс компьютерных программ позволил снизить неопределенность в оценке радиационного воздействия при проведении производственных операций, т.е. иметь более точное представление о возможных дозах облучения. Такой результат достигнут за счёт визуализации радиационного поля, возможности создавать различные сценарии выполнения работ и моделировать их на компьютере с оценкой радиационных последствий для исполнителей этих работ. Входными данными для расчётов могут служить как результаты измерений радиационной обстановки, выполненные персоналом службы радиационной безопасности предприятия, так и информация об активности, радионуклидном составе и геометрии источников излучения. Комплекс программ содержит в своем составе мощный аналитический блок, предназначенный для поддержки принятия решений службой радиационной безопасности предприятия. Комплекс компьютерных программ позволяет организовать тренировку персонала перед выполнением производственных операций в трёхмерной виртуальной среде и прогнозировать индивидуальные дозы персонала в предстоящих работах.

Ключевые слова: радиационно-опасные объекты, культура безопасности, трёхмерное моделирование, методология ALARA, радиационная защита

ABSTRACT

Purpose: To improve the safety culture of personnel of the department Andreev Bay of Northwest Center for Radioactive Waste SevRAO — branch of Enterprise for Radioactive Waste RosRAO (NWC SevRAO) for spent nuclear fuel and radioactive waste through the use of dynamic three-dimensional modeling software.

Material and methods: NWC SevRAO is temporary storage of radioactive waste generated during operation and decommissioning of the nuclear submarines and ships. According to an integrated expert evaluation this site is the most dangerous nuclear facility in the Northwest of Russia. Environmental rehabilitation of the site is now in progress and is supported by strong international collaboration. For the department Andreev Bay of NWC SevRAO was developed software tools that allows dynamically visualize the radiation situation and calculate doses in the virtual 3D model of the territory and buildings of the industrial complex.

Results: Designed software tools help to reduce uncertainty in the assessment of radiation exposure during operations, i.e. to have more precise information of the possible radiation doses. This result is achieved by visualization of the radiation field and by the ability of creation of different scenarios and simulation on the computer with real-time assessment of radiation effects on participants of these works. The input data for calculations can be measurements of the radiation situation, made by personnel of radiation safety service, or the information about the activity, radionuclide composition and geometry of radiation sources. Software includes a powerful analytical unit designed for radiation safety staff to support decision making process.

Software tools allows to raise the qualification of staff through training, to optimize doses by modeling of different scenarios of work and to plan individual doses for personnel in the forthcoming operations.

Key words: radiation hazardous facilities, safety culture, 3D simulation, methodology ALARA, radiological protection

¹ Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва. E-mail: nicemind@ya.ru

² Институт энергетических технологий, Норвегия

³ Северо-Западный центр по обращению с радиоактивными отходами «СевРАО»

⁴ Межрегиональное управление № 120 ФМБА России

⁵ Государственное управление Норвегии по ядерной и радиационной безопасности.

⁶ ДМС Абингдон

¹ A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of FMBA, Moscow, Russia. E-mail: nicemind@ya.ru

² Institute for Energy Technology

³ Northwest Center for Radioactive Waste Management "SevRAO"

⁴ Interregional management № 120 of FMBA

⁵ Norwegian Radiation Protection Authority

⁶ GMS Abingdon Ltd

Введение

На Северо-Западе России по различным критериям оценки (количеству накопленных РАО и ОЯТ, радиационному риску, риску с учетом интегрального ущерба и интегральной экспертной оценке) наибольшую степень опасности [1] представляет бывшая береговая техническая база военно-морского флота в губе Андреева (в настоящее время — СЗЦ «СевРАО»). В работах [2–5] показано, что потенциально наиболее опасными для персонала СЗЦ «СевРАО» являются технологические операции по обращению с ОЯТ и высокоактивными РАО. Данное обстоятельство вызвано специфическими условиями, сложившимися в отделении «Губа Андреева» СЗЦ «СевРАО» к началу работ по вывозу ОЯТ [6] и реабилитации загрязненных участков территории [7], в том числе:

- недостаточным объемом информации о радиационном и физическом состоянии ОЯТ и высокоактивных РАО, находящихся в бывшем хранилище ОЯТ. Данное обстоятельство требует проведения дополнительных исследований до планирования и проведения работ по удалению высокоактивных ядерных материалов из здания и его последующего вывода из эксплуатации;
- вынужденным перемещением ОЯТ из хранилища ОЯТ в блоки сухого хранения (БСХ) — сооружения, по проекту не предназначенные для этих целей;
- недостаточным объемом информации о количестве дефектных сборок с ОЯТ;
- наличием на территории пункта временного хранения (ПВХ), в производственных зданиях и сооружениях повышенных уровней содержания техногенных радионуклидов и внешнего гамма-излучения;
- уникальным характером проектируемых технологий и оборудования по обращению с ОЯТ и РАО; предполагается использование нестандартного оборудования и приспособлений, не имеющих аналогов на других предприятиях атомной промышленности;
- необходимостью практически одновременного проведения работ на загрязненных территориях по выводу из эксплуатации ряда зданий и сооружений или их реконструкции и строительства новых производственных зданий, предназначенных для проведения работ по обращению с ОЯТ и переработке РАО;
- небезопасным (аварийным) состоянием строительных конструкций ряда зданий и сооружений;
- необходимостью использования специальных средств индивидуальной защиты персонала, проведением части радиационно-опасных работ в неблагоприятных метеорологических условиях на открытой местности;

- отсутствием достаточного количества квалифицированного персонала;
- необходимостью использования специальных средств коллективной защиты персонала при обращении с ОЯТ и РАО.

В Нормках радиационной безопасности (НРБ-99/2009) [8], а также в рекомендациях МКРЗ [9] сказано, что любая деятельность, которая может привести к облучению участников работ, должна быть проведена в соответствии с тремя основными принципами: принципом обоснования, принципом оптимизации¹ и принципом ограничения облучения. МАГАТЭ различает три уровня состояния культуры безопасности: низкий, средний и высокий [10]. На любом уровне обеспечение безопасности является организационной целью предприятия, а наиболее эффективным решением для достижения этой цели служит реализация принципа оптимизации. Этот принцип должен применяться на всех стадиях организации производственного процесса и эксплуатации радиационного объекта, начиная со стадии проектирования, в процессе эксплуатации и вплоть до завершения вывода объекта из эксплуатации и захоронения отходов.

Объектами оптимизации являются:

- дозовые нагрузки персонала (индивидуальные и коллективные дозы) при приоритете индивидуальных доз;
- активность выбросов и сбросов;
- удельная активность и общее количество образующихся РАО.

Исходя из перечисленного выше, администрацией предприятия должна быть разработана система стимуляции выполнения работ с минимизацией лучевых нагрузок в сочетании с контролем со стороны отдела радиационной безопасности.

На сегодняшний день в отделении «Губа Андреева» СЗЦ «СевРАО» выполняется ряд международных проектов. В частности, идёт активное сотрудничество с норвежскими специалистами. Благодаря такому взаимодействию стала возможна разработка и внедрение инновационных подходов практической реализации принципа оптимизации, а именно, информационно-аналитической системы радиационной безопасности персонала и программы для создания трёхмерных динамических сценариев проведения радиационно-опасных работ.

¹ АЛАРА (англ. ALARA, сокр. As Low As Reasonably Achievable) — один из основных критериев, сформулированный в 1954 г. Международной комиссией по радиологической защите с целью минимизации вредного воздействия ионизирующей радиации. Предусматривает поддержание на возможно низком и достижимом уровне как индивидуальных (ниже пределов, установленных действующими нормами), так и коллективных доз облучения, с учётом социальных и экономических факторов.

Методы

С целью реализации принципа ALARA на предприятии СЗЦ «СевРАО» в 2008 г. ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России выпустил методические указания [11]. Они предназначены для использования федеральным органом исполнительной власти (Межрегиональное Управление №120 ФМБА России), уполномоченным осуществлять санитарно-эпидемиологический надзор, и службой радиационной безопасности предприятия при планировании проведения радиационно-опасных работ с источниками ионизирующего излучения.

Очередным этапом после разработки методических указаний стал российско-норвежский проект DOSEMAP по созданию информационно-аналитической системы радиационной безопасности персонала СЗЦ «СевРАО» (ИАС РБП), одной из функций которого была информационная поддержка принятия решений по реализации принципа оптимизации на данном предприятии. Проект развивался в 3 этапа — создание специализированного программного обеспечения на базе методологии RADRUE [12], внедрение его на предприятии СЗЦ «СевРАО» и доработка ИАС РБП с учётом накопленного опыта эксплуатации. Параллельно третьему этапу, был реализован совместный проект ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России и Института энергетических технологий (IFE, Норвегия) «Средства динамической визуализации радиационной обстановки²». Его результатом стал комплекс компьютерных программ, позволяющий динамически визуализировать радиационную обстановку на виртуальной модели территории и помещений производственного комплекса. Он представляет собой систему из двух компьютерных программ — Andreeva Planner и Andreeva Terrain Viewer.

Созданный комплекс компьютерных программ позволил снизить неопределенность в оценке радиационного воздействия при проведении производственных операций, т.е. иметь более точное представление о возможных дозах облучения. Такой результат достигнут за счёт визуализации радиационного поля, возможности создавать различные сценарии выполнения работ и моделировать их на компьютере с оценкой радиационных последствий для исполнителей этих работ. Входными данными для расчётов могут служить как результаты измерений радиационной обстановки, выполненные персоналом службы радиационной безопасности предприятия, так и информация об активности, радионуклидном составе и геометрии источников излучения. Программы содержат

в своем составе мощный аналитический блок, предназначенный для поддержки принятия решений. Результаты данных проектов улучшили возможность планирования защитных мероприятий перед выполнением производственных операций [13,14].

Результаты

Согласно [11], при планировании радиационно-опасных работ должны быть рассмотрены различные варианты их выполнения. При этом предпочтительными являются способы выполнения работы с наименьшими индивидуальными дозами персонала.

Перед началом работы проводится анализ существующих данных (например, данных систем мониторинга) и радиационное обследование места проведения работ.

Для выбора оптимальной стратегии действий радиологические данные должны быть представлены для анализа в удобной для пользователя форме. Система, основанная на сочетании программного обеспечения DOSEMAP и DRIVE, предлагает эффективные способы представления данных для лиц, принимающих решения в простой для понимания форме.

В ИАС РБП существует специальный интерфейс для сбора и организации данных, характеризующих радиационную обстановку на площадке. База данных ИАС РБП содержит набор карт и схем помещений предприятия с привязкой точек измерения мощности дозы и поверхностного загрязнения. Для каждой точки дозиметристами вводятся измеренные значения за соответствующий временной период. Также программа позволяет автоматически формировать акты радиометрических обследований.

Расчет доз персонала является одной из базовых функций ИАС РБП. Эта компьютерная программа позволяет не только рассчитать дозу какого-либо одного субъекта (индивидуальная доза), но и рассчитывать дозу по фрагментам территории объекта для любого количества работников (распределение коллективной дозы по фрагментам карты территории объекта). Пример распределения коллективной дозы по фрагментам территории объекта представлен на рис. 1.

Аналитический раздел ИАС РБП содержит подпрограммы для решения задач, основанные на использовании методов теории графов [15] (рис. 2), а именно:

- Поиск пути из точки А в точку Б с наименьшей дозой.
- Поиск пути обхода территории предприятия с получением минимальной дозы (как провести ради-

² Dynamic RadIation Visualization Engine, сокращенно «DRIVE».

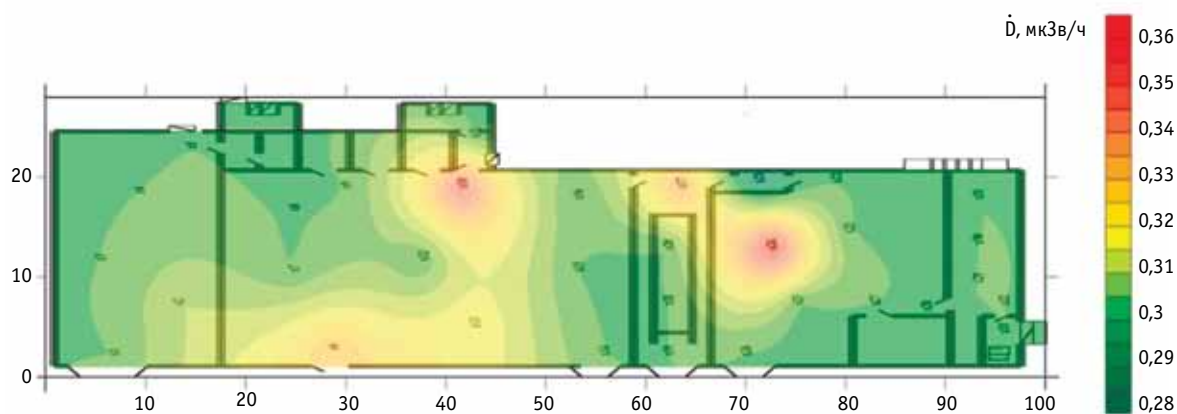


Рис. 1. Расчет коллективной дозы по фрагментам топоосновы

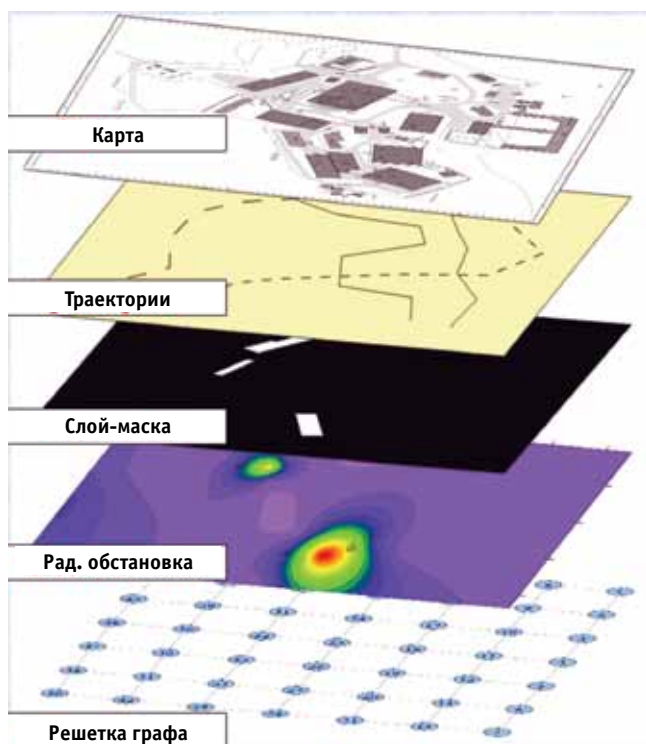


Рис. 2. Пятислойная карта, которая используется в ИАС РБП

ационную разведку на территории предприятия и получить при этом минимальную дозу).

На рис. 3а, 3б и 3в показаны в графической форме результаты решения перечисленных выше задач. Пользователь ИАС РБП может не согласиться с тем, что предложенное компьютером решение является оптимальными, и нарисовать траекторию перемещения субъекта, исходя из своего опыта работы. В таком случае доза, соответствующая новой траектории, будет также рассчитана средствами ИАС РБП и сравнена с дозой, которую получил бы исполнитель в случае движения по траектории, предложенной компьютерной программой. На рис. 3а приведён пример, где маршрут, проложенный экспертом, даёт дозу 0,5 мкЗв, а оптимальная траектория, предложенная ИАС РБП, — 0,3 мкЗв. На рис. 3б продемонстрировано решение задачи оптимальной последовательности обхода контрольных точек, на рис. 3в — решение задачи о поиске пути обхода территории предприятия с получением минимальной дозы. Показана транспортная сеть предприятия с последовательностью объезда узловых точек (вершин транспортной сети). Веса ребер сетки графа (рис. 3в) соответствуют дозе, полученной при проходе ребра.

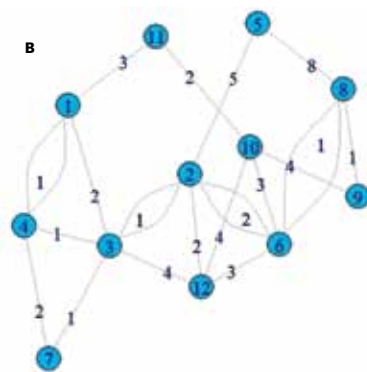
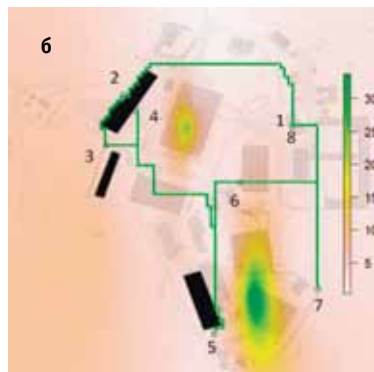
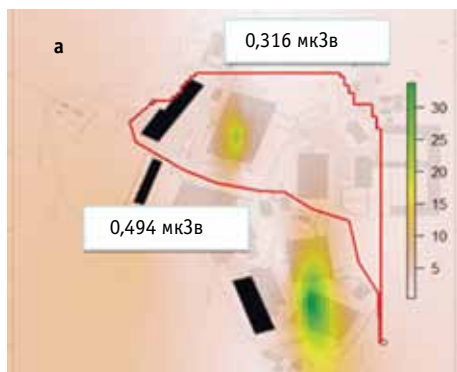


Рис. 3. Результаты решения экстремальных задач дозиметрии

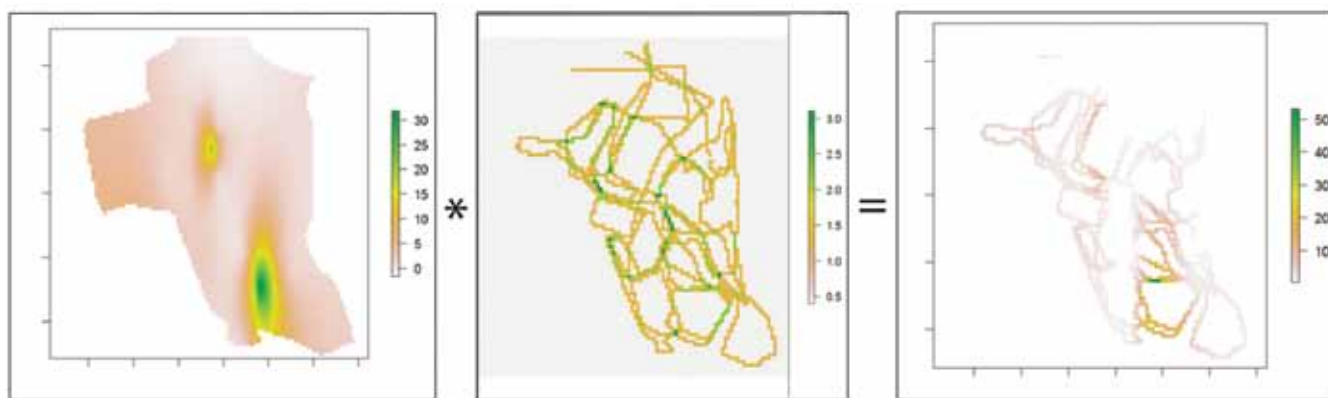


Рис. 4. Визуализация карты радиационной обстановки, как пример разделения помещения на различные зоны

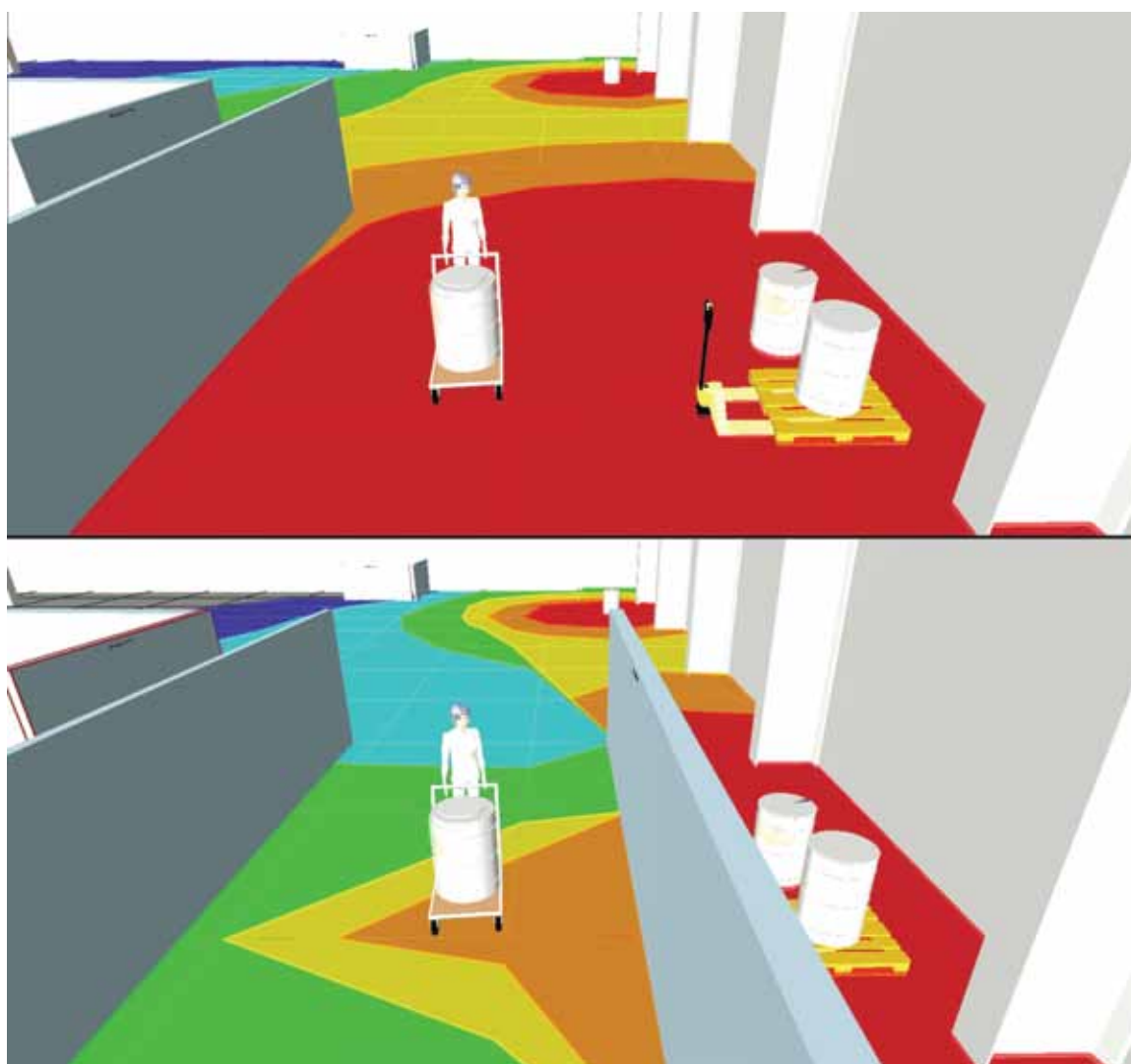


Рис. 5. Программа Andreeva Planner. Демонстрация визуализации радиационной обстановки в реальном времени

Следующим этапом планирования радиационно-опасных работ является разделение места проведения работ на зоны в соответствии с уровнем

мощности дозы. Границы зон должны быть четко видны лицам, принимающим решения, для осознанного планирования работы и проведения опти-

мальных рабочих маршрутов. Интеграция аналитической части системы ИАС РБП с компьютерными программами Andreeva Planner и Andreeva Terrain Viewer является эффективным инструментом для визуализации радиационной обстановки и отображения зон (рис. 4).

Компьютерная программа Andreeva Planner оказалась эффективным средством сравнения различных стратегий проведения радиационно-опасных работ. Andreeva Planner предлагает эффективный путь для моделирования сценариев работы и оценки дозы в реальном времени [16]. Кроме того, эта программа позволяет пользователю определить радиоактивные источники, воздействующие на участников моделируемой ситуации. Пользователь может легко понять, какие источники вносят максимальный вклад в дозу, и разработать схему альтернативных действий в рамках сценария.

Возможность изменения параметров в реальном времени позволяет пользователю (лицу, принимающему решения) видеть, как изменяется радиационная обстановка и дозы работников при изменении схемы работ. Пользователь в виртуальной среде может изменять маршруты персонала, передвигать оборудование, устанавливать различные средства коллективной защиты (рис. 5). Это позволяет проверять разные варианты, пока не будет найден подходящий.

Иногда необходимо сравнить различные сценария проведения одной и той же работы, например, с применением различного оборудования и разным количеством участников. Andreeva Planner предла-

гает удобные функции для сравнения сценариев по основным параметрам: индивидуальная и коллективная доза, затраченное время и т.д.

Все радиационно-опасные работы на промышленной площадке СЗЦ «СевРАО» должны иметь разрешение (наряд-допуск к работам). В программе ИАС РБП имеется опция, предназначенная для формирования и распечатки наряда-допуска. В наряде-допуске указывается следующее:

- наименование работы;
- дата выполнения работы;
- место проведения работы;
- контрольные уровни факторов радиационного воздействия (мощность дозы внешнего гамма-излучения, объёмная активность бета-аэрозолей и др.);
- разрешённая индивидуальная эффективная и эквивалентная доза за время выполнения работы;
- время выполнения работы (максимально допустимое время нахождения на данном участке);
- применяемые индивидуальные и коллективные средства индивидуальной защиты (СИЗ);

ИАС РБП позволяет определить объем радиационного контроля при заданном допустимом значении погрешности параметров радиационной обстановки. Программа позволяет определить потребность в проведении дополнительных измерений, исходя из величины градиентов мощности дозы или из наибольшей погрешности в определении величины мощности дозы [13]. Пример реше-

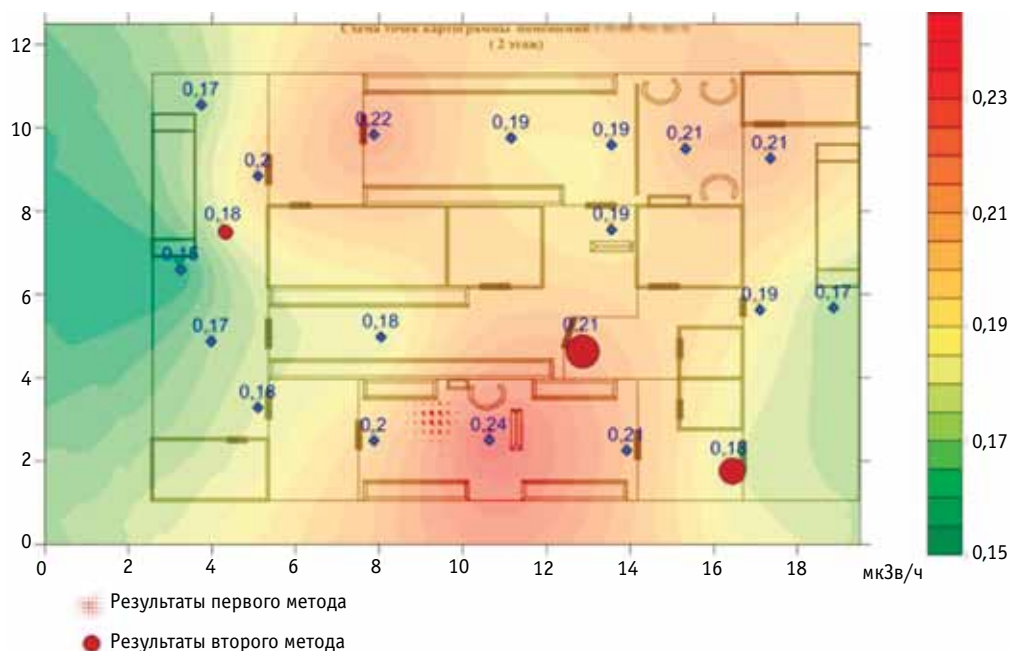


Рис. 6. Визуализация областей, в которых необходимо в первую очередь провести радиационный контроль

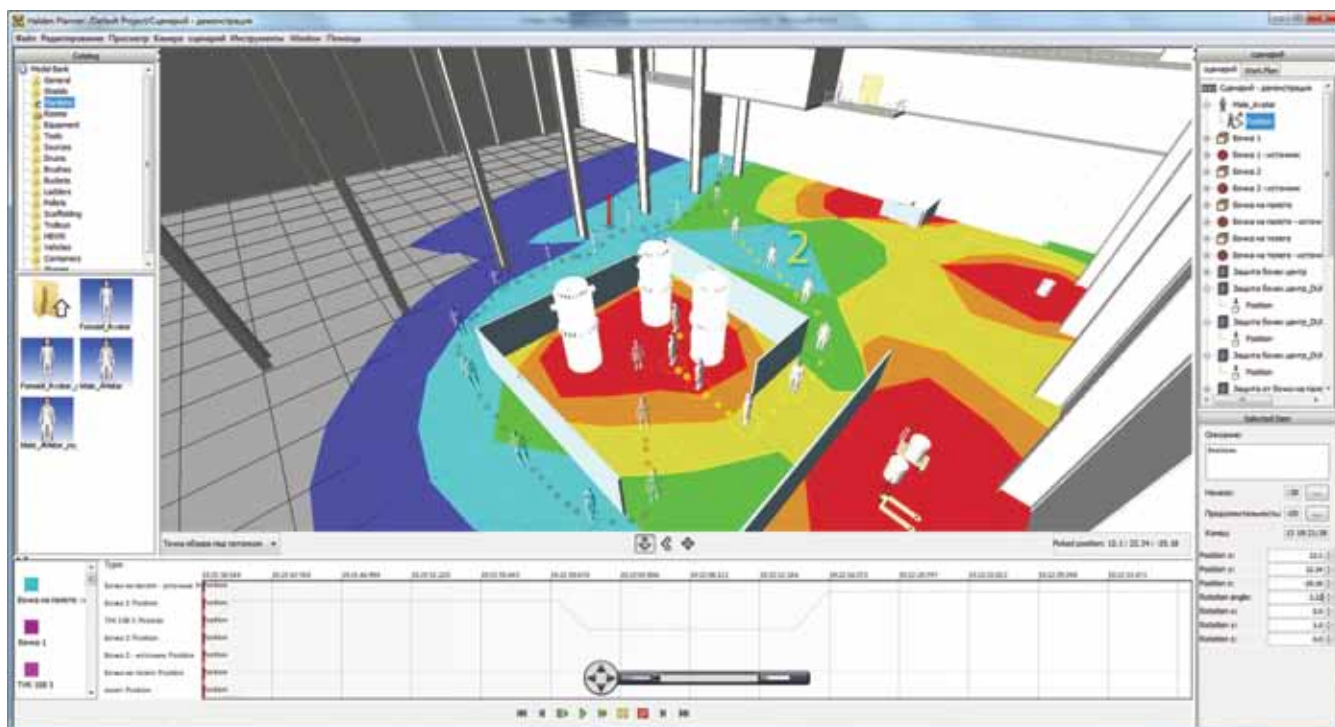


Рис. 7. Andreeva Planner, моделирование различных вариантов выполнения

ния задач в одной и той же радиационной ситуации приведен на рис. 6.

На заключительном этапе подготовки к работе рекомендуется проведение тренировки персонала [11]. По итогам такой тренировки работники должны быть ознакомлены со стоящими перед ними задачами, иметь опыт в выполнении запланированных задач, знать о связанных с работой рисках, иметь хорошее понимание правил безопасности на местах, быть готовыми реагировать в кризисных ситуациях, а также понимать, что разработанная стратегия является оптимальной и отклонение от неё приведёт к более высоким дозам. В [11] также указано, что подготовка с помощью виртуальных тренажёров должна рассматриваться с точки зрения увеличения безопасности и минимизации затрат. Таким средством для тренировки персонала может быть использована компьютерная программа Andreeva Planner, поскольку возможность воспроизведения подготовленного визуального сценария в формате 3D делает Andreeva Planner эффективным инструментом для обучения. Программа позволяет увидеть реалистичную модель выполнения задачи, с одновременной визуализацией уровней мощности дозы, т.е. радиационного поля (рис. 7). В дополнение к демонстрации оптимальной стратегии действий инструмент может быть применен и

для демонстрации альтернативных сценариев, и для объяснения негативных последствий отклонения от плана работ. Наконец, Andreeva Planner может также использоваться для моделирования возможных неудач и оптимальных вариантов стратегии реагирования на подобные неудачи.

Следующим шагом после подготовительного этапа следует непосредственное выполнение работ. Для этой фазы в [11] предусматривается, что облучение всех участников систематически контролируется на протяжении всей операции в целях обеспечения защиты в соответствии с принципом ALARA. Для этого в месте проведения работ осуществляется постоянный радиационный контроль, а все участники имеют при себе персональные дозиметры. Технология, описанная в данной статье, в настоящее время активно развивается и используется для контроля доз персонала, участвующего в работах на площадке СЗЦ «СевРАО».

Финальным шагом каждого этапа работы является сравнение фактических (измеренных) доз с ожидаемыми. Случаи превышения прогнозируемой дозы должны быть тщательно проанализированы, а план проведения работ — скорректирован, чтобы избежать подобных инцидентов в оставшихся фазах радиационно-опасной работы. В случае таких отклонений совместная российско-норвежская си-

Таблица 1

Реализация принципа оптимизации в отделении «Губа Андреева» СЗЦ «СЕВРАО»



стема будет применяться для реконструкции реальных рабочих процессов и оценки дозы. Результаты такого анализа будут чрезвычайно ценными для выявления причин отклонений от плана работы, которые привели к избыточной экспозиции.

Схема, демонстрирующая применение принципа оптимизации на СЗЦ «СевРАО» с помощью программного комплекса, разработанного в результате российско-норвежского сотрудничества, приведена в табл. 1.

Выводы

На СЗЦ «СевРАО» внедрён комплекс компьютерных программ, который позволяет снизить неопределённость в оценке радиационного воздействия при проведении производственных операций. Такой результат достигнут за счёт визуализации радиационного поля, возможности создавать различные сценарии выполнения работ и моделировать их на компьютере с оценкой доз облучения исполнителей этих работ.

Созданный комплекс компьютерных программ используется для поддержки принятия решений службой радиационной безопасности СЗЦ «СевРАО». Данный комплекс позволяет организовывать тренировки персонала предприятия перед выполнением производственных операций, а также прогнозировать индивидуальные дозы персонала в предстоящих работах.

Весьма перспективным является использование данного комплекса компьютерных программ для проектирования новых объектов, в том числе расчёта

толщины стен, компоновки производственных помещений и оборудования, выбора средств коллективной защиты персонала.

Благодарность

Авторы выражают благодарность д.т.н. С.М. Шинкарёву за ценные советы и замечания, высказанные им при подготовке статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев А.В. История и состояние системы обращения с ОЯТ и РАО на Северо-Западе Российской Федерации. Доклад на семинаре КЭГ «Обращение с РАО ядерного наследия перед захоронением: переработка, кондиционирование и хранение», 17–19 мая 2011, Херингсдорф — Остров Узедом, Германия, 2011, 13 с.
2. Ilyin I., Kochetkov O., Simakov A. et al. Initial Threat Assessment. Radiological Risks Associated with SevRAO Facilities Falling Within the Regulatory Supervision Responsibilities of FMBA. StrålevernRapport 2005:17, Østerås: Statens strålevern, Norway, NRP, 2005, 61 pp.
3. Savkin M., Sneve M., Grachev M. et al. Medical and radiological aspects of emergency preparedness and response at SEVRAO facilities. // J. Radiol. Protection, 2008, 28, No. 4, P. 499–509.
4. Shandala N., Titov A., Novikova N. et al. Radiation Protection of the Public and Environment near Location of SevRAO Facilities. // In Proc. of a NATO Advanced Research Workshop «Challenges in Radiation Protection and Nuclear Safety Regulation of

- the Nuclear Legacy» — Springer: Dordrecht, 2008, P. 215–223.
5. *Sneve M., Kiselev M., Kochetkov O. et al.* Improvement of the Regulative Base of the Occupational, Public and Environmental Protection Supervision during SNF Removal and in the Course of Remedial Works at SevRAO (Research Report). StrålevernRapport 2008:8, Østerås: Statens strålevern, Norway, NRPA, 2008, 177 pp.
 6. *Simakov A.V., Sneve M.K., Abramov Yu.V. et al.* Radiological Protection Regulation during Spent Nuclear Fuel and Radioactive Waste Management in the Western Branch of FSUE “SevRAO”. // J. Radiol. Protection, 2008, **28**, No. 4, P. 467–479.
 7. *Шандала Н.К., Филонова А.А., Щелканова Е.С. и соавт.* Радиационно-гигиенический мониторинг в районе размещения пункта временного хранения отработанного ядерного топлива и радиоактивных отходов в губе Андреева // Мед. радиол. и радиац. безопасность, 2014, **59**, № 2, С. 5–12.
 8. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. Гигиенические нормативы — М.: СанПиН 2.6.1.2523-09, 2009, 116 с.
 9. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. // Ann. ICRP, No. 37, No. 2–4, 2007, 343 pp.
 10. International Atomic Energy Agency. Key Practical Issues in Strengthening Safety Culture, INSAG-15, Vienna, IAEA, 2002, P. 2–4.
 11. Методические указания «Особенности применения принципа ALARA при обращении с ОЯТ и РАО в Филиале № 1 ФГУП «СевРАО». МУ 2.6.1.05–08, Б-ка ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2008.
 12. *Kryuchkov V., Chumak V., Maceika E. et al.* RADRUE method for reconstruction of external photon doses for Chernobyl liquidators in epidemiological studies. // Health Phys., 2009, **97**, No. 4, P. 275–298.
 13. *Чижов К.А., Симаков А.В., Крючков В.П.* Метод решения аналитических задач для обеспечения радиационной безопасности персонала при планировании работ по ликвидации последствий аварии на основе интерполяции радиационных полей. // Аппаратура и новости радиац. измерений, 2013, № 2, С. 70–78.
 14. *Чижов К.А., Симаков А.В., Крючков В.П.* Вопросы обеспечения радиационной безопасности при выводе из эксплуатации радиационных объектов. // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды, 2011, № 3, С. 110–112.
 15. *Райгородский А.М.* Экстремальные задачи теории графов и анализ данных. — М.: Регулярная и хаотическая динамика, 2009, 120 с.
 16. *Szöke I., Johnsen T.* Human-centred radiological software techniques supporting improved nuclear safety. // Nucl. Safety and Simulation, 2013, No. 4, P. 219–225.

Поступила: 16.07.2014

Принята к публикации: 25.03.2015