

Разработка сценариев облучения населения для земельных участков с остаточным радиоактивным загрязнением

И.Л. Абалкина, А.А. Аракелян, Е.В. Муленкова, А.А. Самойлов, С.В. Панченко, М.Ю. Ширнин

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва, Россия

В статье рассмотрен опыт разработки сценариев облучения населения для земельных участков с остаточным радиоактивным загрязнением на примере 3 площадок, расположенных в городах Москве и Санкт-Петербурге. Цель исследования состояла в идентификации предполагаемых групп пользователей земельных участков и выборе параметров для расчета доз облучения. Сценарии облучения при использовании земельных участков для проживания или работы описывались такими параметрами, как время пребывания, нахождение внутри помещений или на открытом воздухе, физическая активность и др. Пути облучения для выбранных пользователей определялись с использованием инструментария концептуальной модели площадки. Для расчетов в рамках ряда сценариев было выполнено геомиграционное моделирование распространения радионуклидов в окружающей среде с использованием расчетного кода GeRa. Расчеты доз облучения групп населения проводились с помощью программного модуля «Экорад-Аква». Дозы рассчитывались по каждому пути облучения. Проведенное исследование показывает, что предложенный сценарий «Работник офиса» может быть применен для различных земельных участков при их планируемом использовании для размещения административных, производственных, научных, торговых зданий и сооружений, сценарий «Строительный рабочий» – для участков, на которых ведутся строительные и земляные работы. Сценарий «Житель» по своим параметрам применим к условиям многоквартирной жилой застройки в крупных городах. В перспективе целесообразна разработка типового сценария для работника, чья деятельность связана с нахождением на открытом воздухе и состоит в проведении работ по уходу и содержанию территории. Указанные сценарии могут использоваться в качестве готовых решений для расчетов доз облучения населения от остаточной радиоактивности на площадках выводимых из эксплуатации объектов использования атомной энергии и реабилитируемых территориях. Оценки годовых эффективных доз облучения населения необходимы для планирования работ по выводу из эксплуатации и реабилитации и определения значений радиационных факторов в соответствующих проектах.

Ключевые слова: остаточное радиоактивное загрязнение, сценарий облучения, предполагаемое будущее использование земельных участков, концептуальная модель площадки, путь облучения, доза облучения, вывод из эксплуатации, реабилитация.

Введение

В соответствии с федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии НП-091-14¹ под остаточным радиоактивным загрязнением понимается загрязнение радионуклидами зданий, сооружений, помещений объектов использования атомной

энергии (ОИАЭ), объектов окружающей среды на площадке ОИАЭ, образовавшееся в результате эксплуатации ОИАЭ и остающееся после завершения работ по выводу из эксплуатации (ВЭ). Проектная документация ВЭ должна предусматривать перечень радиационных факторов, определяющих воздействие остаточного радиоактивного

¹ Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Обеспечение безопасности при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии. Общие положения» (НП-091-14). Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 20.05.2014 г. № 216 [Federal rules and regulations in the field of nuclear energy use «Ensuring of safety during decommissioning of nuclear facilities. General provisions». Approved by order of the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service of 20.05.2014 No. 216. (In Russ.)]

Абалкина Ирина Леонидовна

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук

Адрес для переписки: 115191, Москва, ул. Б. Тульская, д. 52; E-mail: abalkina@ibrae.ac.ru

загрязнения на персонал и (или) население, окружающую среду. Согласно ОСПОРБ 99/2010², проектные решения по выводу радиационного объекта из эксплуатации должны предусматривать реабилитацию высвобождаемых площадей и территорий, в проекте следует оценить ожидаемые индивидуальные и коллективные дозы облучения персонала и населения.

В зарубежной практике ВЭ ОИАЭ и реабилитации территорий учет будущего использования земельных участков является важной составляющей при планировании работ [1–4]. Например, Агентство по охране окружающей среды США на основе консультаций с заинтересованными сторонами принимает решение о вероятном использовании загрязненного участка для целей дальнейшей разработки мероприятий по очистке. В число самых общих видов использования входят жилищное, промышленное/торговое, рекреационное и экологическое. Конкретные типы объектов (т.е. офисный комплекс, торговый центр, футбольный стадион и др.) определяются при наличии более детальной информации [1].

Для характеристики загрязненных участков и выработки мер по очистке в мире широко используется такой инструмент, как концептуальная модель площадки (КМП) [5–7]. КМП – письменное или графическое представление экологической системы и биологических, физических и химических процессов, которые определяют перенос загрязняющих веществ из источников через компоненты природной среды к экологическим рецепторам в системе [8]. КМП представлена в большом числе зарубежных руководств и пособий [8–10], в том числе в международном стандарте ИСО 21365 [11]. Среди российских документов следует упомянуть ГОСТ Р 53123-2008³. В центре внимания КМП находится связь «источник – путь – рецептор»⁴, которая позволяет определить пути воздействия, по ко-

торым загрязнение влияет на человека, биоту и другие объекты. МАГАТЭ при описании процесса реабилитации территорий рекомендует создание КМП для описания источников загрязнения и путей облучения на этапе предварительного исследования [12].

Расчеты доз облучения могут выполняться как по типовым сценариям использования земельных участков, так и по сценариям, разрабатываемым для условий конкретной площадки. Обзор зарубежных калькуляторов и используемых в них входных параметров для участков с радиоактивным загрязнением представлен в работе [13].

В России пока не установлены радиационно-гигиенические и экологические критерии, которым должны соответствовать площадки выводимых из эксплуатации ОИАЭ. Данной проблематике посвящено немало публикаций, в том числе [14–16]. В случае частичного освобождения от регулирующего контроля радиационные характеристики площадок могут не совпадать с требованиями, которые будут предъявлены при том или ином их дальнейшем использовании. Проработка реалистичных вариантов будущей деятельности на освобождаемых площадках позволяет обеспечить заблаговременную увязку критериев конечного состояния выводимых из эксплуатации ОИАЭ и реабилитируемых территорий с санитарными нормами, регламентирующими проектирование и строительство зданий различного назначения⁵. В связи с этим актуальной является задача развития методических и практических подходов, позволяющих планировать работы по выводу из эксплуатации и обосновывать конечное состояние площадок с позиций их предполагаемого использования в будущем.

Цель исследования – разработка типовых сценариев облучения населения в зависимости от вариантов

² Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010): Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26.04.2010 г. № 40 (далее ОСПОРБ 99/2010) [Basic sanitary rules for the provision of radiation safety (OSPORB 99/2010). Sanitary rules and norms SP 2.6.1.2612-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 26.04.2010 No. 40 (hereinafter – OSPORB 99/2010). (In Russ.)]

³ Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53123-2008 (ИСО 10381-5:2005). Качество почвы – Отбор проб – Часть 5: Руководство по изучению городских и промышленных участков на предмет загрязнения почвы. Утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18.12.2008 г. № 543-ст. [National Standard of the Russian Federation GOST R 53123-2008 (ISO 10381-5:2005). Soil quality – Sampling – Part 5: Guidance on the procedure for the investigation of urban and industrial sites with regard to soil contamination. Approved and put into action by order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology of 18.12.2008, No. 543-st. (In Russ.)]

⁴ В стандарте ИСО 21365 и других стандартах ИСО в серии «Качество почв» под термином «рецептор» понимается «определенный объект, уязвимый к неблагоприятному воздействию(ям) опасного вещества или фактора» [11]. В настоящей статье использована транслитерация этого термина на русский язык, термин понимается в приведенном выше значении [In ISO 21365 and other ISO standards in the Soil Quality series, the term “receptor” refers to “a specific object that is vulnerable to the adverse effect(s) of a hazardous substance or factor” [11]. This article uses the transliteration of this term into Russian, the term is understood in the meaning given above. (In Russ.)].

⁵ Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 г. № 47 (далее – НРБ-99/2009) [Norms of radiation safety (NRB-99/2009). Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2523-09. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 07.07.2009 No. 47 (hereinafter – NRB-99/2009). (In Russ.)]; Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения: Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2800-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 24.12.2010 г. № 171 [Hygienic requirements for limiting public exposure to the natural sources of ionizing radiation. Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2800-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 24.12.2010 No. 171. (In Russ.)]

будущего использования земельных участков с остаточным радиоактивным загрязнением для определения путей воздействия и расчета доз облучения отдельных лиц и групп пользователей.

Материалы и методы

В работе рассмотрены 3 объекта: бывшая площадка АО «ВНИИХТ» (ныне Московский филиал ФГУП «РАДОИ») в г. Москве по адресу: Каширское шоссе, д. 33; 2 площадки Радиового института им. В.Г. Хлопина в г. Санкт-Петербурге по адресу: 2-й Мурунский пр., д. 28 (площадка № 1) и ул. Рентгена, д. 1 (площадка № 2). Будущее использование площадок ОИАЭ определялось на основе действующих концепций ВЭ с учетом местоположения земельных участков, их инвестиционной привлекательности, наличия градостроительных и иных ограничений.

Для каждого объекта определены группы потенциальных пользователей. В зависимости от характера их деятельности (проживание, работа в офисе или на улице, кратковременное пребывание) устанавливались значения расчетных параметров: длительность нахождения на участке, нахождение в помещении или на открытом воздухе, активная или спокойная деятельность. При определении значений проводилось сравнение с некоторыми калькуляторами, представленными в [13]. Например, в зарубежных расчетных программах типичными значениями длительности пребывания являются 250 дней в году (8 ч/сут) для работника и 350 дней в году (24 ч/сут) для жителя. Для работников нами приняты аналогичные значения, в случае жителя выбран более консервативный вариант – нахождение на участке все 365 дней в году.

В логике КМП предполагается рассмотрение всех путей облучения, включая: 1) внешнее облучение; 2) пероральный путь; 3) ингаляционный путь; 4) взаимодействие с кожными покровами. Далее определяются завершённые пути (где есть связь «источник – путь – рецептор») и незавершённые пути (где отсутствует один из этих элементов). Для каждой группы пользователей в расчетах учитывались только завершённые пути, обусловленные сценариями. Например, вследствие нахождения объектов в городе нами не рассматривался путь поступления

радионуклидов с питьевой водой из скважины, расположенной на земельном участке.

Исходными данными для расчетов послужили материалы исследований на территориях расположения площадок, выполненные в разные годы, и результаты комплексных инженерно-радиационных обследований объектов. Для оценок долговременной безопасности и расчетов в рамках ряда сценариев было выполнено прогнозное геомиграционное моделирование распространения радионуклидов в окружающей среде с использованием расчетного кода GeRa [17]. Расчетные модели верифицированы по результатам радиационного мониторинга территории площадок и районов их размещения, выполняемого по отраслевым стандартам в составе экологического мониторинга окружающей среды на предприятиях и в организациях Государственной корпорации «Росатом». Расчеты доз облучения населения проводились с помощью программного модуля «Экорад-Аква», в основе которого лежат подходы МАГАТЭ к оценке радиационного воздействия на человека и миграции радионуклидов по пищевым цепочкам [18–20]. Результаты прогнозных расчетов сравнивались с пределами доз облучения населения, установленными НРБ-99/2009. Оценивалась возможность применения разработанных сценариев для других земельных участков с аналогичным видом использования.

Результаты и обсуждение

Сценарии для площадки АО «ВНИИХТ». Предполагаемым вариантом будущего использования определено строительство жилых и административных зданий. В качестве пользователей рассмотрены: житель многоквартирного дома; работник офиса; строительный рабочий (табл. 1). Во всех 3 сценариях нахождение на открытом воздухе подразумевает, что рецептор находится на поверхности земли после проведения выемки загрязненного грунта, но до засыпки чистым материалом или обустройства твердого покрытия. Сезонный фактор (наличие снежного покрова) не учитывается. В силу указанных особенностей сценарные условия являются консервативными, а сами сценарии – упрощенными.

Выбранные параметры в целом согласуются с используемыми в зарубежных расчетных программах [13].

Параметры для расчетов по 3 упрощенным сценариям для площадки АО «ВНИИХТ»

Таблица 1

Parameters for calculations for 3 simplified scenarios for JSC «VNIIXT» site

[Table 1]

Параметры [Parameters]	Житель [Resident]	Работник офиса [Office worker]	Строительный рабочий [Construction worker]
Время нахождения в помещении (ч/год) [Time spent indoors (hour/year)]	8030	2000	250
Фактор экранирования в помещении (по отношению к мощности дозы на открытом воздухе) [Shielding factor (with regard to dose rate outdoors)]	0,5	0,5	0,9
Внешнее облучение (время нахождения на открытом воздухе, ч/год) [External exposure (Time spent outdoors (hour/year))]	730	125	2000
Внутреннее облучение (пероральный путь для почвы) [Internal exposure (soil ingestion)]			
– мг/сут [mg/day]	40	20	300
– г/год [g/year]	15	5	75

Параметры [Parameters]	Житель [Resident]	Работник офиса [Office worker]	Строительный рабочий [Construction worker]
Внутреннее облучение (ингаляционный путь для пыли) [Internal exposure (dust inhalation)]			
объем воздуха [air volume]			
– м ³ /ч [m ³ /hour]	0,9	1,0	1,3
– м ³ /год [m ³ /year]	7900	2125	3000
поступление пыли [dust intake]			
– мг/м ³ [mg/m ³]	0,1	0,1	0,4
– г/год [g/year]	0,8	0,2	1,2

При разработке сценария «Строительный рабочий» нами предварительно было определено, что пероральным путем поступает 100 мг почвы в сутки, что оказалось заниженной оценкой, исходя из предполагаемых условий работ и в сравнении с зарубежными калькуляторами. В RESRAD-ONSITE значение для взрослого индивида составляет 36,5 г/год из расчета 365 дней, в калькуляторах PRG и DCC – 25 и 82,5 г/год для работника на открытом воздухе и строительного рабочего соответственно. В итоговом сценарии нами принято значение 300 мг/сут (75 г/год). В сценарии «Житель» для этого пути установлено значение 40 мг/сут (значение годового поступления указано округленно), в сценарии «Работник офиса» – 20 мг/сут, что, с учетом малого времени пребывания на открытом воздухе, представляется консервативной оценкой.

Расчет ингаляционного поступления может проводиться на основе усредненных значений или же с детализацией по полу, возрасту, характеру физической активности. В DCC объем вдыхаемого воздуха по умолчанию составляет для жителя и фермера 0,83 м³/ч, в RESRAD-ONSITE – 0,95 м³/ч (для промышленного рабочего – 1,3 м³/ч) [13]. В справочнике Агентства по охране окружающей среды США [21] приводятся, со ссылкой на Публикацию 23 МКРЗ, следующие значения: 22,8, 21,1 и 14,4 м³/сут для референтных мужчины, женщины и ребенка соответственно, при этом предполагается 8-часовой сон и 16 ч легкой активности (для взрослых это 8 ч работы и 8 ч остальных занятий). Первоначально нами были определены значения в 0,8, 0,9 и 1 м³/ч для сценариев «Житель», «Работник офиса» и «Строительный рабочий» соответственно, в итоговых сценариях они пересмотрены в сторону увеличения. Поступление в органы дыхания пыли, поднимающейся с поверхности земли, консервативно принято в значениях мг/м³ вдыхаемого воздуха (без разделения на нахождение на открытом воздухе и в помещении, без учета сезонности, метеорологии и других условий). Значения годового объема вдыхаемого воздуха и поступления пыли (с учетом типичного содержания пыли в городах Российской Федерации [22]) в таблице 1 даны округленно.

Путь облучения, связанный с кожными покровами, зависит от наличия значимых для этого пути радионуклидов и условий конкретной площадки. В упрощенных сценариях этот путь не рассматривался. Также в упрощенных сценариях не рассматривался ингаляционный путь для радона в помещениях, поскольку вопросы ограничения облучения радоном должны решаться путем соответствия значениям, установленным п. 5.3.2 НРБ-99/2009 и пп. 5.1.3, 5.1.6 ОСПОРБ 99/2010 для новых зданий.

На территории площадки с 2008 по 2020 г. силами АО «ВНИИХТ» и ФГУП «РАДОН» проводились работы по комплексному инженерному и радиационному обследованию (КИРО). В различные годы также осуществлялись мероприятия по реабилитации загрязненных участков. На всех реабилитированных участках мощность ambientalного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения составляет менее 0,3 мкЗв/ч. Для проведения расчетов были проанализированы результаты проведенной в 2020 г. пешеходной гамма-съемки территории и глубинного обследования участка площадью 0,89 га (методом гамма-каротажа скважин и анализа проб). Максимальное значение МАЭД гамма-излучения составило 0,6 мкЗв/ч, отмечена значительная неравномерность распределения радионуклидов по глубине грунта. Анализ данных показал, что полученная информация не позволяет в полной мере оценить объем загрязненного грунта на площадке, требуется проведение дополнительных изысканий. В связи с имеющейся неопределенностью расчеты доз облучения по 3 упрощенным сценариям были проведены по каждому пути облучения, исходя из значений удельной активности в грунте 100 Бк/кг для радионуклидов ²⁴¹Am, ¹³⁷Cs, ²²⁶Ra, ⁹⁰Sr, ²³²Th, ²³⁵U и ²³⁸U (в таблице 2 для примера представлены данные расчетов для ¹³⁷Cs и ²³⁵U, которые дают наибольшие значения доз суммарно по всем путям). Полученные соотношения «концентрация – доза» могут использоваться для уточнения результатов расчета после детальной характеристики площадки, а также для расчетов в рамках других сценариев.

Сценарии были также использованы для расчета значений удельной активности радионуклидов в грунте, соответствующих годовой эффективной дозе в 0,1 мЗв/год (табл. 3). Такие значения удобны для использования в качестве справочных при характеристике земельных участков и определении критериев конечного состояния. Необходимо подчеркнуть, что расчет доз от загрязнения грунта на конкретном участке базируется на результатах измерений, при этом уровни загрязнения в разных его частях могут различаться. Реалистичные оценки учитывают это обстоятельство, равно как и неопределенность уровней загрязнения при ограниченных объемах исследований. Когда же идет обратный пересчет доз в удельную активность, то предполагается равномерное загрязнение грунта по глубине и площади от одного радионуклида.

Сценарии для АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина». ВЭ объектов на площадках № 1 и № 2 планируются по варианту ликвидации (немедленного демонтажа) без сноса зданий. При разработке сценариев

Таблица 2

Оценка эффективных доз облучения по 3 упрощенным сценариям при удельной активности ^{137}Cs и ^{235}U в грунте 100 Бк/кг, мЗв/год

[Table 2]

Assessment of effective doses for 3 simplified scenarios at 100 Bq/kg activity concentration of ^{137}Cs and ^{235}U in soil, mSv/year

Радионуклид [Radionuclide]	Путь облучения [Exposure pathway]	Житель [Resident]	Работник офиса [Office worker]	Строительный рабочий [Construction worker]
^{137}Cs	Внешнее облучение: [External exposure]			
	на открытом воздухе [outdoors]	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-2}$
	в помещении [indoors]	$5,9 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$
	Пероральный путь [Ingestion]	$2 \cdot 10^{-8}$	$6,5 \cdot 10^{-9}$	$9,8 \cdot 10^{-8}$
	Ингаляционный путь [Inhalation]	$3,7 \cdot 10^{-10}$	$9,2 \cdot 10^{-11}$	$5,5 \cdot 10^{-10}$
	Всего [Total]	$7 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$
^{235}U	Внешнее облучение: [External exposure]			
	на открытом воздухе [outdoors]	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$4,7 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$
	в помещении [indoors]	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$8,4 \cdot 10^{-4}$
	Пероральный путь [Ingestion]	$7,1 \cdot 10^{-8}$	$2,4 \cdot 10^{-8}$	$3,5 \cdot 10^{-7}$
	Ингаляционный путь [Inhalation]	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$6,2 \cdot 10^{-8}$	$3,7 \cdot 10^{-7}$
	Всего [Total]	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$8,3 \cdot 10^{-3}$

Таблица 3

Удельная активность радионуклидов в грунте, формирующая годовую эффективную дозу облучения 0,1 мЗв в соответствии с упрощенными сценариями, Бк/кг

[Table 3]

Activity concentration of radionuclides in soil resulting in annual effective dose of 0.1 mSv with regard to simplified scenarios, Bq/kg

Радионуклид [Radionuclide]	Житель [Resident]	Работник офиса [Office worker]	Строительный рабочий [Construction worker]
^{241}Am	$3 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^4$	$6,5 \cdot 10^3$
^{137}Cs	$1,4 \cdot 10^2$	$5,9 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^2$
^{226}Ra	$1,3 \cdot 10^4$	$5,5 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^4$
^{90}Sr	$2,9 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^6$	$6,2 \cdot 10^5$
^{232}Th	$1,5 \cdot 10^5$	$6,3 \cdot 10^5$	$2,8 \cdot 10^5$
^{235}U	$5,6 \cdot 10^2$	$2,4 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^3$
^{238}U	$1,5 \cdot 10^5$	$6,3 \cdot 10^5$	$3,2 \cdot 10^5$

принято, что разрешенным использованием земельных участков будет размещение производственных, научных, административных зданий, строений, сооружений и обслуживающих их объектов. Для площадки № 1 так-

же рассматривается возможность размещения жилых зданий.

Исходя из указанных предпосылок, к площадке № 1 применимы все 3 сценария, разработанные для площад-

ки АО «ВНИИХТ», к площадке № 2 – сценарий «Работник офиса». Дополнительно для обеих площадок также предложен сценарий для работника, который находится вне помещений (условное название – «Охранник»). «Охранник» проводит 2000 ч в год на открытом воздухе без ведения активной деятельности (параметры для ингаляционного пути аналогичны сценарию «Работник офиса»). Для упрощения расчетов исключается нахождение во временном сооружении легкой конструкции (типа будки, навеса и т.п.). С учетом компактности площадок и использования твердых покрытий на большей их части пероральный путь для почвы оставлен только для сценариев, связанных с разрытием грунта.

На территории площадки №1 в 2012–2015 гг. силами ОАО «ВНИПИЭТ» и АО «Радиевый институт» были выполнены работы по комплексному инженерному и радиационному обследованию. Согласно результатам КИРО, территория не имеет значительных участков радиоактивного загрязнения, в то же время выявлено остаточное загрязнение грунтов по глубине, которое характеризуется неоднородным и разнообразным радионуклидным составом. В 2019 г. был проведен объектный мониторинг состояния недр (ОМСН) на площадках, проведена гамма-съемка. Диапазон значений МАЭД гамма-излучения составил 0,11–0,32 мкЗв/ч. Загрязнение грунта обусловлено ¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs, ⁶⁰Co, ⁹⁰Sr.

Для расчетов сделано консервативное предположение, что пользователи испытывают радиационное воздействие от наиболее загрязненного участка площадью 100 м². Уровни загрязнения других частей площадки значительно ниже. В силу этого дозы облучения (табл. 4) завышены для всех пользователей и могут служить верхней границей дозовых оценок до проведения реабилитации. Более 95% вклада в дозу облучения приходится на ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co и ¹³⁴Cs. При заданных условиях годовая эффективная доза облучения превышает установленный НРБ-99/2009 предел доз для населения для сценария «Житель». Поскольку сценарий с проживанием может быть реализован только после окончания работ по ВЭ ОИАЭ и завершения нового строительства, фактическая дозовая нагрузка для этой группы пользователей будет многократно снижена.

На территории площадки № 2 в 2016 г. выполнено расширение существующей системы ОМСН, в результа-

те чего на площадке № 2 создана система мониторинга недр, пробы подземных вод и грунта отобраны и исследованы в лабораториях АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина». В 2013 и 2019 гг. силами ОАО «ВНИПИЭТ» и АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина» были выполнены КИРО. В 2019 г. в рамках КИРО в двух шурфах было отобрано 8 проб грунта и 1 проба грунтовой воды. Основными загрязняющими радионуклидами являлись ²²⁶Ra и ¹³⁷Cs. Диапазон значений МАЭД гамма-излучения составлял 0,13–0,27 мкЗв/ч, исследование проводилось по регулярной сетке с шагом 10 м. В итоге выделено 6 участков вероятного загрязнения, на которых необходимо провести бурение и послыйный отбор проб грунта для оценки уровней и равномерности загрязнения. В связи с тем, что на момент проведения геомиграционного моделирования отсутствовали точные данные о фактическом содержании радионуклидов по каждому участку, задача консервативно решалась с предположением о содержании радионуклидов в грунте на уровне их отнесения к радиоактивным отходам.

К площадке № 2 не применим сценарий «Строительный рабочий», т.к. здания относятся к объектам культурного наследия, что исключает их снос. Для учета вклада перорального и ингаляционного пути для данной площадки предложен сценарий «Бурильщик» (как альтернатива сценарию «Строительный рабочий»). Работник находится на открытом воздухе в теплое время года в течение 200 ч (8-часовой рабочий день в течение 5 недель) и занят работами, связанными со вскрытием твердых поверхностей (ремонт коммуникаций, прокладка линий связи и т.п.). Результаты расчетов показали, что дозы облучения для указанных групп пользователей будут определяться в основном внешним облучением от поверхности земли (табл. 5). При заданных условиях дозы облучения для работников, постоянно находящихся на территории, превышают установленные пределы доз для населения. Более 95% вклада приходится на ¹³⁷Cs и ²³⁵U.

В условиях неопределенности картины загрязнения под фундаментами зданий площадки № 2 была поставлена задача оценки доз облучения, связанного с миграцией радионуклидов. Подземные воды в районе площадки не являются источниками питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения, поэтому для решения задачи был

Таблица 4

Оценка эффективных доз облучения по 4 сценариям для площадки № 1 Радиевого института им. В.Г. Хлопина, мЗв/год

[Table 4

Assessment of effective doses for 4 scenarios for V.G. Khlopin Radium Institute site № 1, mSv/year]

Пути облучения [Exposure pathways]		Житель [Resident]	Работник офиса [Office worker]	Строительный рабочий [Construction worker]	Охранник [Security guard]
Внутреннее облучение [Internal exposure]	Ингаляционный путь [Inhalation]	6,2·10 ⁻⁵	1,65·10 ⁻⁵	9,29·10 ⁻⁵	1,95·10 ⁻⁵
	Пероральный путь [Ingestion]	–	–	2,97·10 ⁻⁵	–
Внешнее облучение [External exposure]	На открытом воздухе [Outdoors]	0,3	5,12·10 ⁻²	0,91	0,91
	В помещении [Indoors]	1,7	0,41	5,71·10 ⁻²	–
Всего [Total]		1,95	0,46	0,97	0,91

Оценка эффективных доз облучения по 3 сценариям для площадки № 2 Радиевого института им. В.Г. Хлопина, мЗв/год

Таблица 5

[Table 5]

Assessment of effective doses for 3 scenarios for V.G. Khlopin Radium Institute site № 2, mSv/year

Пути облучения [Exposure pathways]	Работник офиса [Office worker]	Бурильщик [Driller]	Охранник [Security guard]	
Внутреннее облучение [Internal exposure]	Ингаляционный путь [Inhalation]	1,03·10 ⁻⁴	5,12·10 ⁻⁵	9,65·10 ⁻⁵
	Пероральный путь [Ingestion]	–	6,8·10 ⁻⁵	–
Внешнее облучение [External exposure]	На открытом воздухе [Outdoors]	0,24	0,38	3,78
	В помещении [Indoors]	1,9	–	–
Всего [Total]	2,13	0,38	3,78	

разработан отдельный сценарий с условным названием «Сантехник». «Сантехник» работает в коллекторе 1 ч в день в течение года (всего 250 ч в год). Через неплотности и микротрещины в коллектор попадает некоторое количество загрязненных вод (в расчетах принято значение 1 л/год). Предполагается, что содержащиеся в воде радионуклиды осели на дно коллектора на сравнительно небольшой площади, на которой работает сантехник. Для данного сценария по результатам проведенного геомиграционного моделирования с учетом цепочек распада для каждого дозообразующего радионуклида выполнены дозовые оценки для пиковых значений активностей, приходящихся для различных радионуклидов на различные временные периоды (табл. 6). Оценка доз носит иллюстративный характер, более точные расчеты могут быть произведены после получения реальных входных данных.

Расчетами по площадкам АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина» показано, что дозы облучения для сценария «Охранник» близки комбинации доз для сценариев «Строительный рабочий» (по дозе внешнего облучения) и «Работник офиса» (по ингаляционному пути). Таким образом, сценарий «Охранник» при наличии 2 других не является информативным. Хотя формально сценарий «Строительный рабочий» не применим к площадке № 2, его основные параметры с определенной корректировкой можно использовать для работника, который посто-

янно находится на открытом воздухе и занят работами по обслуживанию территории. Типовой сценарий с условным названием «Разнорабочий» сможет заменить частные сценарии «Охранник» и «Бурильщик».

Полученные результаты расчетов для площадок № 1 и № 2 могут быть в дальнейшем уточнены при получении дополнительных сведений о фактическом загрязнении, в том числе с учетом выполняемых работ по ВЭ ЯРОО, удалению загрязненного грунта и обустройству твердых покрытий. Предварительные дозовые оценки могут быть использованы для выбора и обоснования мероприятий по снижению радиационного воздействия, а также определения критериев конечного состояния площадок. Например, при использовании на территории площадок значения МАЭД гамма-излучения менее 0,3 мкЗв/ч в качестве одного из критериев конечного состояния (предполагая, что эта величина наполовину обусловлена остаточной радиоактивностью), доза дополнительного внешнего облучения для сценария с нахождением на открытом воздухе составит не более 0,3 мЗв/год.

Заключение

Полученные результаты показали, что разработка сценариев облучения на основе КМП позволяет в должной мере учесть условия мест размещения ОИАЭ и особенности текущего и будущего использования занимае-

Оценка эффективных доз облучения на площадке № 2 Радиевого института им. В.Г. Хлопина для сценария «Сантехник», мкЗв/год

Таблица 6

[Table 6]

Assessment of effective doses for V.G. Khlopin Radium Institute site № 2 for «Plumber» scenario, μSv/year

Период, годы [Time, years]	⁹⁰ Sr+ ¹³⁷ Cs	²³⁷ Np	²²⁶ Ra	²²² Rn+ДПР [²²² Rn+progeny]	²¹⁰ Pb	²³⁵ U	²⁴² Pu
50–150	4·10 ⁻⁹	–	–	–	–	–	–
550–600	–	0,48	–	–	–	–	–
1450–1500	–	–	370	600	0,56	–	–
2950–3000	–	–	–	–	–	10	–
35 000	–	–	–	–	–	–	0,003

мых ими земельных участков. Степень консервативности расчетов доз облучения зависит от неопределенности данных, характеризующих радиационный статус участков и принятых в этой связи допущений. Выполненные оценки демонстрируют вклад путей облучения и отдельных радионуклидов в общую дозовую нагрузку и имеют существенный запас прочности. При получении более точных входных данных расчеты могут быть скорректированы по уже разработанным алгоритмам, т.е. без существенных усилий.

Результаты также продемонстрировали трудности разработки типовых сценариев облучения. Сценарии «Работник офиса» и «Строительный рабочий» являются универсальными и могут быть применены на различных площадках: в дальнейшем сценарий «Работник офиса» целесообразно использовать для более общих случаев работы в помещениях (административных, промышленных и др.), а сценарий «Строительный рабочий» – также для персонала, занятого сооружением инженерных барьеров на объектах ядерного наследия. Сценарий «Житель» может считаться типовым для условий проживания в городе. Для работника, чья деятельность проходит на открытом воздухе, требуется, по-видимому, сформировать типовой сценарий с условным названием «Разнорабочий», объединив и дополнив сценарии «Охранник» и «Бурильщик». Сценарий «Разнорабочий» может быть использован для распространенных случаев деятельности на территории, связанной с ее уборкой, обслуживанием и благоустройством, и будет учитывать пероральный и ингаляционный пути поступления радионуклидов. Для ряда площадок потребуется разработка сценария, связанного с рекреационным использованием территории.

Оценки доз облучения на основе сценариев дают полезную информацию для обоснования принимаемых решений по ВЭ и реабилитации. Подходы к их разработке могут использоваться для обоснованной оценки доз облучения населения и персонала, а в перспективе и для отдельных видов биоты от остаточной радиоактивности на площадках выводимых из эксплуатации объектов использования атомной энергии и других загрязненных участках. Инструментарий КМП и адаптированные под задачу алгоритмы, необходимые для расчета миграции радионуклидов и оценки дозовых нагрузок на различные группы населения, дают возможность на этапе проектирования оценить эффективность тех или иных решений по ВЭ и реабилитации, когда известны варианты будущего использования земельных участков. Результаты расчетов могут служить основой для экспресс-оценок радиационной обстановки, определения вклада различных путей в дозы облучения, обоснования вариантов проведения работ и определения критериев конечного состояния. Возможна быстрая адаптация разработанных сценариев под условия конкретных площадок. В дальнейшем целесообразно выбрать типовые сценарии облучения с закреплением в методических документах в качестве рекомендаций для проведения расчетов на предварительных этапах характеристики площадок, а также при обосновании вариантов проведения работ, разработке проектов ВЭ ЯРОО и реабилитации территорий.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Абалкина И.Л. разработала сценарии облучения при будущем использовании земельных участков, подготовила текстовый вариант статьи.

Аракелян А.А. выполнил расчеты доз облучения с помощью программного модуля «Экорад-Аква».

Муленкова Е.В. разработала модель миграции нуклидов в границах ближней зоны площадки АО «ВНИИХТ» и трехмерную геомиграционную модель площадки № 1 Радиевого института им. В.Г.Хлопина, выполнила геомиграционное моделирование.

Самойлов А.А. осуществил постановку задач и вел общее руководство исследовательской работой.

Панченко С.В. подготовил исходные данные для расчетов доз облучения.

Ширнин М.Ю. разработал трехмерные геомиграционные модели и выполнил геомиграционное моделирование для площадки АО «ВНИИХТ», площадки № 2 Радиевого института им. В.Г. Хлопина.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Финансирование работы осуществлялось по государственным контрактам № Д.4ш.244.20.19.1046 от 26.07.2019 г. и № Д.4ш.244.20.21.1135 от 06.07.2021 г. с Госкорпорацией «Росатом».

Литература

1. Reuse Assessments: A Tool To Implement The Superfund Land Use Directive. OSWER 9355.7-06P. Washington D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 2001. 24 p. URL: <https://clu-in.org/download/toolkit/thirdednew/reuseassesstool.pdf> (дата обращения: 24.01.2023).
2. Considering Reasonably Anticipated Future Land Use and Reducing Barriers to Reuse at EPA-lead Superfund Remedial Sites. OSWER 9355.7-19. Washington D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 2010. 14 p. URL: <https://semspub.epa.gov/work/HQ/175563.pdf> (дата обращения: 24.01.2023).
3. Use of Risk-Based End States. Policy DOE P 455.1. Washington D.C.: U.S. Department of Energy, 2003. 4 p. URL: <https://www.directives.doe.gov/directives-documents/400-series/0455.1-APolicy/@images/file> (дата обращения: 24.01.2023).
4. Management of soils contaminated by the activities of Basic Nuclear Installations. ASN Guide No. 24, Version of 08/30/2016. 30 p. URL: <https://www.french-nuclear-safety.fr/asn-regulates/asn-guides/asn-guide-no.-24> (дата обращения: 23.01.2023).
5. Абалкина И.Л., Панченко С.В. Концептуальная модель площадки как пример лучших практик в области реабилитации. Препринт № ИБРАЕ-2020-02. М.: ИБРАЭ РАН, 2020. 49 с.
6. Абалкина И.Л., Панченко С.В.. Концептуальная модель площадки как инструмент планирования работ по реабилитации // Вопросы радиационной безопасности. 2020. № 2(98). С. 3–11.
7. Лучшие зарубежные практики вывода из эксплуатации ядерных установок и реабилитации загрязненных территорий. Том 1 / под общ. ред. И.И. Линге и А.А. Абрамова. М.: ИБРАЭ РАН, 2017. 366 с.
8. Standard Guide for Developing Conceptual Site Models for Contaminated Sites. ASTM International E1689-95(2008). 9 p.

9. Environmental Cleanup Best Management Practices: Effective Use of the Project Life Cycle Conceptual Site Model. EPA 542-F-11-011. Washington D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 2011. 12 p. URL: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-04/documents/csm-life-cycle-fact-sheet-final.pdf> (дата обращения: 23.01.2023).
10. Technical Guidance for Preparation and Submission of a Conceptual Site Model. Version 1.1. New Jersey Department of Environmental Protection, 2019. 46 p. URL: https://www.nj.gov/dep/srp/guidance/srra/csm_tech_guidance.pdf (дата обращения: 23.01.2023).
11. ISO/DIS 21365. Soil quality – Conceptual site models for potentially contaminated sites. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:21365:dis:ed-1:v1:en> (дата обращения: 23.01.2023).
12. Remediation Strategy and Process for Areas Affected by Past Activities or Events. IAEA Safety Standards Series No. GSG-15. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2022. 201 p.
13. Shubayr N. Overview of Radiation Risk and Dose Assessment Models for Radioactively Contaminated Sites and Selected Default Input Parameters. U.S. Environmental Protection Agency, ORISE, 2017. 73 p. URL: https://epa-prgs.ornl.gov/radionuclides/Overview_of_Rad_R.A.Ms.pdf (дата обращения: 23.01.2023).
14. Абалкина И.Л., Панченко С.В., Савкин М.Н., и др. Социально и экологически приемлемые критерии реабилитации загрязненных территорий пунктов размещения особых радиоактивных отходов // Вопросы радиационной безопасности. 2017. № 3(87). С. 46–52.
15. Романович И.К., Стамат И.П., Санжарова Н.И., Панов А.В. Критерии реабилитации объектов и территорий, загрязненных радионуклидами в результате прошлой деятельности: Часть 1. Выбор показателей для обоснования критериев реабилитации // Радиационная гигиена. 2016. Т. 9, № 4. С. 6–15. DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-4-6-15.
16. Голиков В.Ю., Романович И.К.. Обоснование радиологических критериев использования территорий с остаточным радиоактивным загрязнением на основе дозового подхода // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 4. С. 6–22. DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-4-6-22.
17. Капырин И.В. Расчетные коды для гидрогеологического моделирования в задачах оценки безопасности ОИАЭ // Радиоактивные отходы. 2022. № 2. С. 105–115. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-105-118.
18. Аракелян А.А., Блохин А.И., Блохин П.А., и др. Развитие программного комплекса КОРИДА и опыт его применения при решении задач обращения с ОЯТ и РАО // Радиоактивные отходы. 2022. № 3. С. 107–116. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-107-116.
19. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments. Technical Reports Series No. 472. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010. 194 p.
20. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности. Общие требования безопасности. Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 3. Вена: МАГАТЭ, 2015. 477 с.
21. Exposure Factors Handbook 2011 Edition (Final Report). EPA/600/R-09/052F. Washington D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 2011. 62 p. URL: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/efh-frontmatter.pdf> (дата обращения: 24.01.2023).
22. Ежегодник «Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2021 г.». СПб.: ФГБУ «ГГО» Росгидромета, 2022. 254 с. URL: <http://voeikovmgo.ru/index.php/deyatelnost/publikaci/40-perechen-materialov-izdannyykh-ggo> (дата обращения: 24.01.2023).

Поступила: 27.03.2023 г.

Абалкина Ирина Леонидовна – кандидат экономических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук. **Адрес для переписки:** 115191, Москва, ул. Б. Тульская, д. 52; e-mail: abalkina@ibrae.ac.ru

Аракелян Арам Айкович – научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва, Россия

Муленкова Екатерина Викторовна – руководитель проекта, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва, Россия

Самойлов Андрей Анатольевич – старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва, Россия

Панченко Сергей Владимирович – заведующий лабораторией, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва, Россия

Ширнин Михаил Юрьевич – инженер, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва, Россия

Для цитирования: Абалкина И.Л., Аракелян А.А., Муленкова Е.В., Самойлов А.А., Панченко С.В., Ширнин М.Ю. Разработка сценариев облучения населения для земельных участков с остаточным радиоактивным загрязнением // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 2. С. 91-101. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-91-101

Development of public exposure scenarios for land sites with residual radioactive contamination

Irina L. Abalkina, Aram A. Arakelyan, Ekaterina V. Mulenikova, Andrey A. Samoylov, Sergey V. Panchenko, Mikhail Yu. Shirnin

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences

The article considers the experience of development of public exposure scenarios for land sites with residual radioactive contamination on the example of three sites located in Moscow and St. Petersburg. The study was intended to identify the anticipated groups of land users and select parameters for calculating radiation doses. Exposure scenarios regarding use of land sites for living or working were described by such parameters as duration of the stay, staying indoors or outdoors, physical activity, etc. Exposure pathways for selected users were identified using the conceptual site model approach. For calculations within a number of scenarios, geomigration modeling of radionuclide transport in the environment was performed using the GeRa code. Exposure doses for population groups were calculated using the Ecorad-Aqua software module. Doses were calculated for each exposure pathway. The study demonstrates that the proposed scenario "Office worker" can be applied to various sites that are planned for placing administrative, industrial, scientific, commercial buildings and structures, scenario "Construction worker" – for sites with construction and excavation activities underway. The parameters of the "Resident" scenario allow for its application for the multi-apartment residential development in large cities. In the future, it is practical to develop a typical scenario for an outdoor worker whose activity is to provide care and maintenance of the site. These scenarios can be used as ready-made solutions for calculating radiation doses for the population from residual radioactivity at the nuclear sites under decommissioning and remediated areas. Estimates of annual effective doses for the population are needed for decommissioning and remediation planning and determination of the values of radiation factors in the relevant projects.

Key words: residual radioactive contamination, exposure scenario, anticipated future land use, conceptual site model, exposure pathway, radiation dose, decommissioning, remediation.

Personal participation of the authors

I.L. Abalkina developed exposure scenarios regarding future use of land sites, prepared a text version of the paper.

A.A. Arakelyan performed radiation dose calculations using software module «Ecorad-Aqua».

E.V. Mulenikova developed migration model of near zone for JSC "VNIИHT" site and three-dimensional geomigration model of Khlopin Radium Institute site № 1, performed computations.

A.A. Samoylov carried out the setting of tasks and supervised the research.

S.V. Panchenko prepared input data for radiation dose calculations.

M.Yu. Shirnin developed three-dimensional geomigration models and performed computations for JSC "VNIИHT" site, Khlopin Radium Institute site № 2.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Funding sources

The work was funded under state contracts No. D.4sh.244.20.19.1046 dated July 26, 2019 and No. D.4sh.244.20.21.1135 dated July 6, 2021 with State corporation «Rosatom».

References

1. Reuse Assessments: A Tool To Implement The Superfund Land Use Directive. OSWER 9355.7-06P. Washington D.C.: U.S. Environmental Protection Agency; 2001. 24 p. Available from: <https://clu-in.org/download/toolkit/thirdednew/reuseassess-tool.pdf> (Accessed 24 Jan 2023).
2. Considering Reasonably Anticipated Future Land Use and Reducing Barriers to Reuse at EPA-lead Superfund Remedial Sites. OSWER 9355.7-19. Washington D.C.: U.S. Environmental Protection Agency; 2010. 14 p. Available from: <https://sems-public.epa.gov/work/HQ/175563.pdf> (Accessed 24 Jan 2023).
3. Use of Risk-Based End States. Policy DOE P 455.1 Washington D.C.: U.S. Department of Energy; 2003. 4 p. Available from: <https://www.directives.doe.gov/directives-documents/400-series/0455.1-APolicy/@@images/file> (Accessed 24 Jan 2023).
4. Management of soils contaminated by the activities of Basic Nuclear Installations. ASN Guide No. 24, Version of 08/30/2016. 30 p. Available from: <https://www.french-nuclear-safety.fr/asn-regulates/asn-guides/asn-guide-no.-24> (Accessed 23 Jan 2023).
5. Abalkina IL, Panchenko SV. Conceptual Site Model as an Example of Best Practices in Remediation. Preprint № IBRAE-2020-02. Moscow: Nuclear Safety Institute (IBRAE) RAS; 2020. 49 p. (In Russian).
6. Abalkina IL, Panchenko SV. Conceptual Site Model as an Instrument for Remediation Planning. *Voprosy radiatsionnoi*

Irina L. Abalkina

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences

Address for correspondence: 52 B. Tul'skaya street, Moscow, 115191, Russia; E-mail abalkina@ibrae.ac.ru

- bezopasnosti = Journal of Radiation Safety Issues*. 2020;2(98): 3–11. (In Russian).
7. Best Foreign Practices in Decommissioning of Nuclear Installations and Remediation of Contaminated Areas. Volume 1. Ed. by I.I. Linge and A.A. Abramov. Moscow: Nuclear Safety Institute (IBRAE) RAS; 2017. 366 p. (In Russian).
 8. Standard Guide for Developing Conceptual Site Models for Contaminated Sites. ASTM International E1689-95(2008). 9 p.
 9. Environmental Cleanup Best Management Practices: Effective Use of the Project Life Cycle Conceptual Site Model. EPA 542-F-11-011. Washington D.C.: U.S. Environmental Protection Agency; 2011. 12 p. Available from: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-04/documents/csm-life-cycle-fact-sheet-final.pdf> (Accessed 23 Jan 2023).
 10. Technical Guidance for Preparation and Submission of a Conceptual Site Model. Version 1.1. New Jersey Department of Environmental Protection; 2019. 46 p. Available from: https://www.nj.gov/dep/srp/guidance/srra/csm_tech_guidance.pdf (Accessed 23 Jan 2023).
 11. ISO/DIS 21365. Soil quality – Conceptual site models for potentially contaminated sites. Available from: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:21365:dis:ed-1:v1:en>. (Accessed 23 Jan 2023).
 12. Remediation Strategy and Process for Areas Affected by Past Activities or Events. IAEA Safety Standards Series No. GSG-15. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2022. 201 p.
 13. Shubayr N. Overview of Radiation Risk and Dose Assessment Models for Radioactively Contaminated Sites and Selected Default Input Parameters. U.S. Environmental Protection Agency, ORISE; 2017. 73 p. Available from: https://epa-prgs.ornl.gov/radionuclides/Overview_of_Rad_R.A.Ms.pdf (Accessed 23 Jan 2023).
 14. Abalkina I.L., Panchenko S.V., Savkin M.N., Vedernikova M.V., Kryshev I.I. Socially and Ecologically Acceptable Criteria for Remediation of Contaminated Areas of Non-Retrieveable Waste Facilities. *Voprosy radiatsionnoi bezopasnosti = Journal of Radiation Safety Issues*. 2017;87(3): 46–52. (In Russian).
 15. Romanovich I.K., Stamat I.P., Sanzharova N.I., Panov A.V. Criteria for rehabilitation of facilities and territories contaminated with radionuclides as a result of past activities: Part 1. The choice of indicators for justification of the criteria for rehabilitation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2016;9(4): 6–15. DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-4-6-15. (In Russian).
 16. Golikov V.Yu., Romanovich I.K. Justification for the radiological criteria for the use of areas with residual radioactive contamination based on the dose approach. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(4): 6–22. DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-4-6-22. (In Russian).
 17. Kapyrin I.V. Computational Codes for the Hydrogeological Modeling in the Safety Assessment of Nuclear Facilities. *Radioaktivnye Otkhody = Radioactive Waste*. 2022;2: 105–118. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-105-118. (In Russian).
 18. Arakelyan A.A., Blohin A.I., Blohin P.A., Vaneev Yu.E., Kazieva S.T., Kizub P.A., et al. Refinement of KORIDA Software Complex and its Application in Addressing SNF and RW Management Problems. *Radioaktivnye Otkhody = Radioactive Waste*. 2022;3: 107–116. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-107-116. (In Russian).
 19. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments. Technical Reports Series No. 472. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2010. 194 p.
 20. Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards. IAEA safety standards series no. GSR Part 3. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2014. 436 p.
 21. Exposure Factors Handbook 2011 Edition (Final Report). EPA/600/R-09/052F. Washington D.C.: U.S. Environmental Protection Agency; 2011. 62 p. Available from: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/efh-front-matter.pdf> (Accessed 24 Jan 2023).
 22. Yearbook “The state of atmospheric pollution in Russian cities in 2021”. St. Petersburg: FGBI “MGO”; 2022. 254 p. Available from: <http://voeikovmgo.ru/index.php/deyatelnost/publikacii/40-perechen-materialov-izdannyykh-ggo> (Accessed 24 Jan 2023) (In Russian).

Received: March 27, 2023

For correspondence: Irina L. Abalkina – Candidate of Economic Sciences, Head of Laboratory, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52 B. Tulsкая street, Moscow, 115191, Russia; E-mail abalkina@ibrae.ac.ru)

Aram A. Arakelyan – Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Ekaterina V. Mulenkova – Project Manager, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Andrey A. Samoylov – Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Sergey V. Panchenko – Head of Laboratory, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Mikhail Yu. Shirnin – Engineer, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

For citation: Abalkina I.L., Arakelyan A.A., Mulenkova E.V., Samoylov A.A., Panchenko S.V., Shirnin M.Yu. Development of public exposure scenarios for land sites with residual radioactive contamination. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 2. P. 91-101. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-91-101