

УДК: 504.054

DOI: 10.26277/SECNRS.2023.107.1.004

© 2023. Все права защищены.

ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОБЪЕКТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПОСЛЕ ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Плотников Д. А.* (plotnikov@secnrs.ru),
Мишагина А. С.* (mishagina@secnrs.ru),
Щадилов А. Е.*, канд. биол. наук (schadilov@secnrs.ru)

Статья поступила в редакцию 6 февраля 2023 г.

Аннотация

Обеспечение радиационной безопасности окружающей среды является одной из приоритетных задач как при эксплуатации существующих объектов использования атомной энергии, так и при планировании будущей деятельности в области использования атомной энергии. В статье приведены результаты анализа действующих российских законодательных и нормативных документов, регулирующих безопасность деятельности в области использования атомной энергии, в части обеспечения радиационной безопасности объектов окружающей среды при эксплуатации и выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии. Проанализированы методические рекомендации по оценке дозовых нагрузок на объекты окружающей среды, предложенные российскими и международными организациями, действующими в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности. На основании проведенного анализа авторами выбран подход, позволяющий консервативно оценить негативное влияние радиации на репрезентативные (референтные) объекты водной и наземной флоры и фауны с использованием факторов дозовой конверсии, позволяющих переходить от измеряемых характеристик радиоактивного загрязнения окружающей среды к дозе облучения растений и животных. Для демонстрации применения выбранного подхода проведены прогнозная оценка мощности поглощенной дозы облучения референтных объектов водной и наземной флоры и фауны на территории радиационного воздействия промышленного уран-графитового реактора ЭИ-2, выведенного из эксплуатации по варианту «захоронение на месте», и сравнение полученных значений с критериями экологически безопасного облучения и допустимого радиационного воздействия на окружающую среду. Полученные результаты демонстрируют возможные подходы к учету радиационного воздействия на окружающую среду при проведении прогнозных оценок безопасности объектов использования атомной энергии.

► **Ключевые слова:** вывод из эксплуатации, радиационная безопасность, окружающая среда, доза облучения.

* Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва, Россия.

FORECAST ASSESSMENT OF THE RADIATION IMPACT OF IONIZING RADIATION SOURCES ON THE ENVIRONMENT AFTER DECOMMISSIONING OF NUCLEAR FACILITIES

Plotnikov D. A.*,
Mishagina A. S.*,
Schadilov A. E.*, Ph. D.

Article is received on February 6, 2023.

Abstract

Radiation safety of the environment is one of the high-priority challenges both for operation of the existing nuclear facilities, and for planning of future activities in the field of atomic energy use. This paper presents the results of analysis of the current Russian legislative and normative documents regulating safety in the field of atomic energy use in terms of ensuring radiation safety of the environment (biota) elements during operation and decommissioning of nuclear facilities. Methodological recommendations on assessment of radiation exposure on biota elements, suggested by the Russian and international organizations involved in ensuring nuclear and radiation safety, were analyzed. Based on this analysis, the authors have chosen an approach allowing for conservative assessment of the adverse radiation impact on the representative (reference) elements of water and land biota using dose conversion factors, which allow you to switch from the measured characteristics of radioactive contamination of the environment to the exposure dose for plants and animals. In order to demonstrate application of the chosen approach, the forecast assessment was carried out for the absorbed dose rate received by the reference elements of water and land biota on the territory covered by radiation impact from the production uranium-graphite reactor EI-2 that was decommissioned using the option “entombment in-situ”, and the obtained values were compared with the criteria of environmentally safe exposure and permissible radiation impact on the environment. The obtained results demonstrate the possible approaches to considering of radiation impact on the environment while carrying out forecast calculations for nuclear facilities’ safety.

► **Keywords:** decommissioning, radiation safety, environment, biota, exposure dose.

* Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia.

Введение

Обеспечение радиационной безопасности окружающей среды является одним из актуальных вопросов настоящего времени. В международных основных нормах безопасности [1] сформулирован принцип защиты нынешних и будущих поколений и окружающей среды от радиационных рисков, а также выдвинуто требование о необходимости подтверждения (а не гипотетического предположения), что окружающая среда защищена от воздействия радиоактивного загрязнения (экоцентрический принцип).

При рассмотрении вопросов обеспечения радиационной безопасности окружающей среды длительное время преобладающей являлась антропологическая концепция, сформулированная в Публикации 26 Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) [2] и Публикации 60 МКРЗ [3], суть которой заключается в том, что безопасность объектов окружающей среды (далее – объектов биоты) обеспечивается нормами контроля, необходимыми для защиты человека. В такой парадигме МКРЗ рассматривала окружающую среду как среду, через которую переносятся радионуклиды, способные непосредственно влиять на радиационную безопасность человека. Данный принцип подвергался критике научным сообществом [4], так как при его реализации не рассматриваются ситуации (радиационные аварии, территории повышенного радиоактивного загрязнения вне мест нахождения населения и пр.), при которых дозы облучения объектов биоты могут быть выше, чем дозы облучения человека в идентичных условиях. В связи с этим международные организации, включая Научный комитет Организации Объединенных Наций по действию атомной радиации, МКРЗ, Международное агентство по атомной энергии и Международный союз радиэкологов, начали уделять внимание экологическим аспектам радиационной защиты, что привело к развитию экоцентрического принципа.

В рамках развития экоцентрического принципа изучению негативного влияния радиационного воздействия на объекты биоты были посвящены международные проекты [5, 6]. Весомый вклад в развитие этого принципа внесла МКРЗ, сформировав рабочую группу для подготовки методических материалов по оценке факторов радиационного воздействия на объекты биоты. Результаты исследований рабочей группы легли в основу Публикации 91 МКРЗ [7], посвященной, в том числе, вопросам реализации стратегии радиационной защиты пред-

ставителей биоты, Публикации 103 МКРЗ [8], содержащей концепцию референтных животных и растений, детальное рассмотрение которой содержится в Публикации 108 МКРЗ [9]. Развитие концепции референтных животных и растений представлено в публикациях МКРЗ 114 [10], 124 [11] и 136 [12].

Вопросы нормативного регулирования и оценки радиационного воздействия на объекты биоты неоднократно поднимались и в Российской Федерации. Например, Российской научной комиссией по радиационной защите отмечалось, что в глобальной и долгосрочной перспективе защита населения и охрана окружающей среды имеют важнейшее значение [13].

Анализ действующих российских нормативных правовых актов, связанных с охраной окружающей среды

Законодательным документом в Российской Федерации, определяющим правовую основу и принципы регулирования отношений, возникающих при использовании атомной энергии, является Федеральный закон № 170-ФЗ [14]. В соответствии со статьей 2 Федерального закона № 170-ФЗ [14] обеспечение безопасности при использовании атомной энергии включает в себя, в числе прочего, защиту окружающей среды.

Статья 30 Федерального закона № 170-ФЗ [14] устанавливает требования о соблюдении норм и правил в области охраны окружающей среды при размещении и сооружении ядерных установок, радиационных источников и пунктов хранения. Требования к охране окружающей среды должны соблюдаться, в соответствии со статьей 43 данного закона, при проектировании, строительстве и эксплуатации космических и летательных аппаратов с ядерными установками или радиационными источниками, а также с использованием энергии радиоактивных веществ.

Требования по защите окружающей среды при эксплуатации объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) содержатся также в федеральных нормах и правилах в области использования атомной энергии НП-016-05, НП-001-15, НП-055-14 [14] и др. Например, для объектов ядерного топливного цикла в пунктах 3.1 и 3.2 НП-016-05 [14] установлено следующее:

«Основной целью обеспечения безопасности объекта ЯТЦ является защита ... окружающей среды от его радиационного воздействия.»

Объект ЯТЦ удовлетворяет требованиям безопасности, если его радиационное воздействие на ... окружающую среду при нормальной эксплуатации, нарушениях нормальной эксплуатации, включая проектные аварии, не приводит к превышению ... нормативов выбросов и сбросов радиоактивных веществ, содержания радиоактивных веществ в окружающей среде, а также ограничивает это воздействие при запроектных авариях».

Стоит отметить, что установление нормативов предельно допустимых выбросов и допустимых сбросов радиоактивных веществ предусмотрено, в соответствии с положениями «Методики разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух» и «Методики разработки нормативов допустимых сбросов радиоактивных веществ в водные объекты для водопользователей» [14], в том числе, исходя из условий обеспечения жизнедеятельности объектов биоты и сохранения биологического разнообразия.

Охране окружающей среды уделяется внимание и в нормативных документах, действующих в области обращения с радиоактивными отходами (РАО). В соответствии с пунктом 3 НП-058-14 [14] одной из целей обеспечения безопасности при обращении с РАО является предотвращение выбросов и сбросов радиоактивных веществ в окружающую среду. В соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации № 1069 [14] при отнесении РАО к особым или удаляемым необходимо установление совокупного размера возможного вреда окружающей среде в случае захоронения таких РАО в месте их нахождения. Радиационная безопасность окружающей среды должна быть обеспечена и после вывода из эксплуатации ОИАЭ. В соответствии с пунктом 15 НП-091-14 [14] проектная документация вывода из эксплуатации ОИАЭ должна содержать также перечень радиационных факторов, определяющих воздействие остаточного радиоактивного загрязнения на окружающую среду.

Правовые основы государственной политики в области охраны окружающей среды определены в Федеральном законе № 7-ФЗ [14]. В частности, в статье 19 предписано установление нормативов качества окружающей среды, нормативов допустимого воздействия на окружающую среду. При этом, согласно статье 20 Федерального закона № 7-ФЗ [14], к нормативам качества относятся нормативы, установленные для физических показате-

телей состояния окружающей среды, в том числе уровней радиоактивности.

В соответствии с пунктом 2 Постановления Правительства Российской Федерации № 149 [15] нормативы качества устанавливаются для оценки состояния окружающей среды, в частности для сохранения естественных экологических систем, генетического фонда растений, животных и других организмов. Таким образом, совместно с Постановлением Правительства Российской Федерации № 149 [15] Федеральный закон № 7-ФЗ [14] предписывает разработку нормативов качества окружающей среды, включая нормативы предельно допустимых концентраций радионуклидов в среде и нормативов, установленных по показателям уровней радиоактивности. В соответствии с пунктом 25 Постановления Правительства Российской Федерации № 149 [15] установление нормативов качества окружающей среды возложено на Минприроды Российской Федерации.

Особенно актуальной тема установления предельно допустимых концентраций радионуклидов в отдельных компонентах природной среды в Российской Федерации стала в связи с развертыванием работ по ликвидации объектов ядерного наследия и обоснованию долговременной безопасности пунктов захоронения РАО, проводимых в рамках Федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года» [16] и Федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года» [17]. При реализации мероприятий первой программы [16] отмечена необходимость доработки законодательной и нормативной базы по обеспечению радиационной безопасности окружающей среды вблизи территорий остаточного радиоактивного загрязнения, образовавшегося в результате деятельности по использованию атомной энергии [18].

По результатам анализа требований действующих российских нормативно-правовых актов, связанных с охраной окружающей среды, можно сделать вывод, что в них установлены требования по обеспечению радиационной безопасности окружающей среды на всех этапах жизненного цикла ОИАЭ. Таким образом, при эксплуатации и выводе из эксплуатации ОИАЭ радиационная безопасность окружающей среды должна быть обеспечена и обоснована. Для обоснования обеспечения радиационной безопасности объектов биоты ведущими российскими и международными организациями

в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности разрабатываются и актуализируются различные методические подходы к оценке радиационного воздействия на данные объекты.

Методические подходы российских и международных организаций к оценке радиационного воздействия на объекты биоты

В настоящее время в Российской Федерации предприняты шаги в направлении развития методической базы в области охраны окружающей среды. Методические подходы к оценке радиационной безопасности объектов биоты представлены в многочисленных литературных источниках, включая рекомендации Росгидромета Минприроды Российской Федерации [19–21], публикации МКРЗ [9–12] и другие научно-технические пособия и публикации, например [22–24].

Результаты анализа российских и международных публикаций по вопросам методических подходов в области обеспечения радиационной безопасности [19–24] показывают, что для оценки радиационного воздействия на объекты биоты повсеместно применяется концепция «референтных животных и растений». Данная концепция заключается в определении мощности поглощенной дозы облучения для определенного набора объектов биоты, отличающихся, с одной стороны, наибольшей радиочувствительностью, а с другой – имеющих наиболее важное значение для нормального функционирования исследуемой экосистемы. Для примера в качестве референтных животных и растений МКРЗ рассматривает следующие двенадцать объектов биоты: «пчела», «дикорастущая трава», «дождевой червь», «лягушка», «крыса», «утка», «олень», «сосна», «бурые водоросли», «краб», «форель» и «камбала» [12].

В соответствии с [9–12] и [19–24] при проведении оценок величины радиационного воздействия на референтные объекты биоты учитываются как внешнее облучение от радиоактивно загрязненной территории, так и внутреннее облучение от радионуклидов, накопленных в организмах объектов. Оценка радиационного воздействия проводится с использованием факторов дозовой конверсии, определяемых как отношение мощности поглощенной дозы к активности радионуклидов внутри организма или во внешней среде. Факторы дозовой конверсии позволяют переходить от измеряемых параметров радиоактивного загрязнения объектов внешней среды к дозе облучения объектов биоты. Рассчитанные значения мощности поглощенной

дозы облучения референтных объектов биоты сравниваются с предельными уровнями облучения, которые определяют диапазон мощности дозы облучения, в пределах которого реализуется вредное воздействие ионизирующего излучения для каждого конкретного референтного объекта биоты.

Демонстрация применения методических подходов к оценке радиационного воздействия на объекты биоты на примере промышленного уран-графитового реактора ЭИ-2

На основании методических подходов, представленных в [9–12] и [19–24], в рамках настоящего исследования была разработана программа для электронных вычислительных машин (ЭВМ), предназначенная для проведения прогнозных оценок мощности поглощенной дозы облучения референтных объектов биоты и визуализации результатов оценок. С использованием разработанной программы для ЭВМ был выполнен прогнозный расчет доз облучения объектов биоты, обитающих в районе бывшей площадки промышленного уран-графитового реактора ЭИ-2 (ПУГР ЭИ-2), выведенного из эксплуатации по варианту захоронения на месте.

ПУГР ЭИ-2 и окружающая его природная среда рассматривались как совокупность следующих составляющих:

- ближняя зона:
 - область источника радионуклидов (графитовая кладка реактора);
 - инженерные барьеры безопасности (глина, бетон) [25, 26];
 - вмещающие горные породы, на которые могло быть оказано влияние при сооружении и эксплуатации ПУГР ЭИ-2 при создании для него инженерных барьеров безопасности;
- дальняя зона:
 - породы, на которые не оказывалось влияние при сооружении и эксплуатации ПУГР ЭИ-2 и при создании барьеров безопасности, при этом изменение состояния пород, в связи с возможными процессами и событиями природного или техногенного происхождения, может привести к изменению характеристик миграции радионуклидов;
 - биосфера: объекты природной среды, в которых возможна миграция радионуклидов (часть атмосферы, почвы, поверхностные воды и пр.).

Предполагалось, что выход радионуклидов из графитовой кладки реактора происходит в следующей последовательности. Радионуклиды диффундируют через глиняный барьер безопасности,

далее мигрируют через следующий барьер (слой бетона) в геосферу. При этом подразумевалось, что бетон не меняет своих прочностных и фильтрационных свойств на протяжении первых 100 лет после вывода из эксплуатации ПУГР ЭИ-2, затем начинается постепенная деградация бетона, и через последующие 200 лет коэффициент фильтрации бетона соответствует коэффициенту фильтрации песка [27]. За период 100–300 лет миграция радионуклидов через бетон происходит за счет процессов диффузии и фильтрации, свыше 300 лет – определяется преимущественно фильтрацией.

После деградации бетонного барьера под ПУГР ЭИ-2 (толщина 6 м [25]) предполагалось, что радионуклиды попадают непосредственно в водоносный горизонт (ненасыщенная зона в данной модели консервативно не учитывалась ввиду ее малой толщины, по сравнению с остальными моделируемыми барьерами). Миграция радионуклидов в водоносном горизонте происходит за счет их распространения с потоком подземных вод с учетом процессов адвекции и дисперсии. При моделировании учитывались задержка радионуклидов вмещающими породами и продольная дисперсия за счет неоднородности порового пространства. В водоносном горизонте радионуклиды перемещаются в направлении области разгрузки подземных вод (р. Томь), используемых для хозяйственно-бытового водопотребления. Гидрогеологические параметры водоносного горизонта, принятые для расчета миграции радионуклидов из ПУГР ЭИ-2 в окружающую среду, приведены в [28, 29]. Коэффициенты распределения в песчано-глинистых породах для рассматриваемых радионуклидов приняты в соответствии с [30].

Таким образом, при оценке радиационного воздействия на объекты биоты учитывалось только воздействие, обусловленное миграцией радионуклидов из системы размещения РАО ПУГР ЭИ-2 с подземными водами и последующим использованием вод в хозяйственной деятельности. Радиационное воздействие на объекты биоты непосредственно в месте размещения выведенного из эксплуатации ПУГР ЭИ-2 не учитывалось (возможный метод оценки такого воздействия представлен, например, в [31]).

Использованные для расчетов удельные активности радионуклидов в графитовой кладке ПУГР ЭИ-2 представлены в таблице. Масса графита составляет 1 500 т [32].

Расчет удельных активностей рассматриваемых радионуклидов в подземных водах и приповерхностном слое почвы проводился с применением

аттестованной программы для ЭВМ “Ecolego 6”, предназначенной для проведения консервативных прогнозных расчетов миграции радионуклидов в системе барьеров безопасности и вмещающей геологической среде [33].

По результатам расчета были получены удельные активности рассматриваемых радионуклидов в подземных водах и в приповерхностном слое почвы. Максимальные удельные активности достигаются для радионуклидов ^{14}C и ^3H , временные зависимости удельных активностей радионуклидов в приповерхностном слое почвы представлены на рис. 1. В целях достижения достаточной информативности полученных результатов на рис. 1 представлены временные зависимости удельных активностей радионуклидов в диапазоне $[1,0 \cdot 10^{-15}, 1,0 \cdot 10^{-1} \text{ Бк/кг}]$. Таким образом, зависимости удельных активностей радионуклидов ^{60}Co , ^{137}Cs и ^{106}Ru на графике не представлены, так как максимально достижимые удельные активности данных радионуклидов меньше нижней границы рассматриваемого диапазона. Результаты расчетов по программе ЭВМ “Ecolego 6” [33] служили в качестве входных данных для разработанной программы для ЭВМ.

Для демонстрации прогнозной оценки мощности поглощенной дозы облучения были выбраны референтные объекты биоты «пчела», «трава», «дождевой червь», «лягушка», «мышь» и «олень». Рассчитанные зависимости мощности поглощенной дозы от времени для выбранных объектов представлены на рис. 2. Для верификации полученных с помощью разработанной программы для ЭВМ результатов были проведены альтернативные расчеты с использованием программного средства “Microsoft Excel”. Результаты проведенных альтернативных расчетов идентичны результатам, полученным с помощью разработанной программы для ЭВМ, что говорит о том, что программа для ЭВМ работает корректно и не содержит ошибок программирования.

Анализ полученных зависимостей мощности поглощенной дозы от времени для выбранных референтных объектов биоты позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, зависимости мощности поглощенной дозы от времени для объектов «лягушка», «мышь» и «олень» идентичны. Это обусловлено тем, что значения факторов дозовой конверсии для рассматриваемых радионуклидов у данных референтных объектов биоты практически идентичны. По этой же причине зависимости мощности поглощенной дозы от времени для объектов «пчела» и «дождевой червь» совпадают

Таблица

**Удельные активности радионуклидов графитовой кладки
промышленного уран-графитового реактора ЭИ-2**
[Specific radionuclide activities of graphite masonry of production uranium-graphite reactor EI-2]

Параметр	³ H	¹⁴ C	³⁶ Cl	⁶⁰ Co	⁹⁰ Sr	¹⁰⁶ Ru	¹³⁷ Cs	²⁴¹ Am
Активность, Бк/г	5,4·10 ³	1,4·10 ⁶	1,1·10 ²	1,4·10 ⁴	1,6·10 ⁶	2,9·10 ⁴	1,1·10 ⁶	1,5·10 ¹
Период полураспада, лет	12,3	5 730	300 000	5,3	29,1	1,01	30,2	433

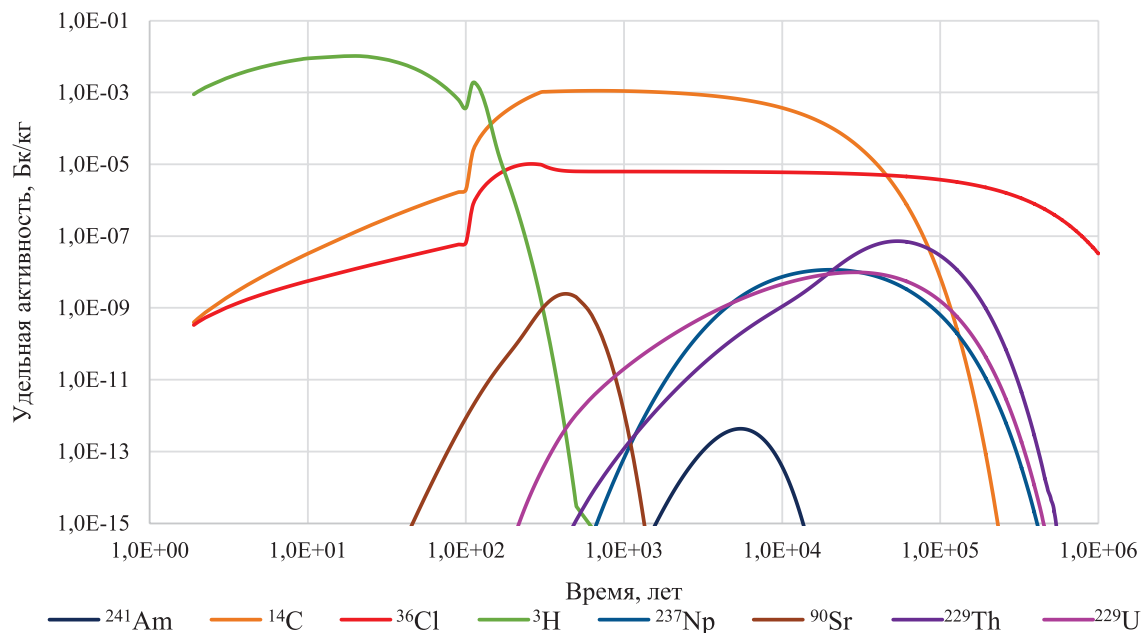


Рис. 1. Графики зависимости от времени удельных активностей радионуклидов в приповерхностном слое почвы [Fig. 1. Time-dependence of specific activities of radionuclides in the near-surface soil layer]

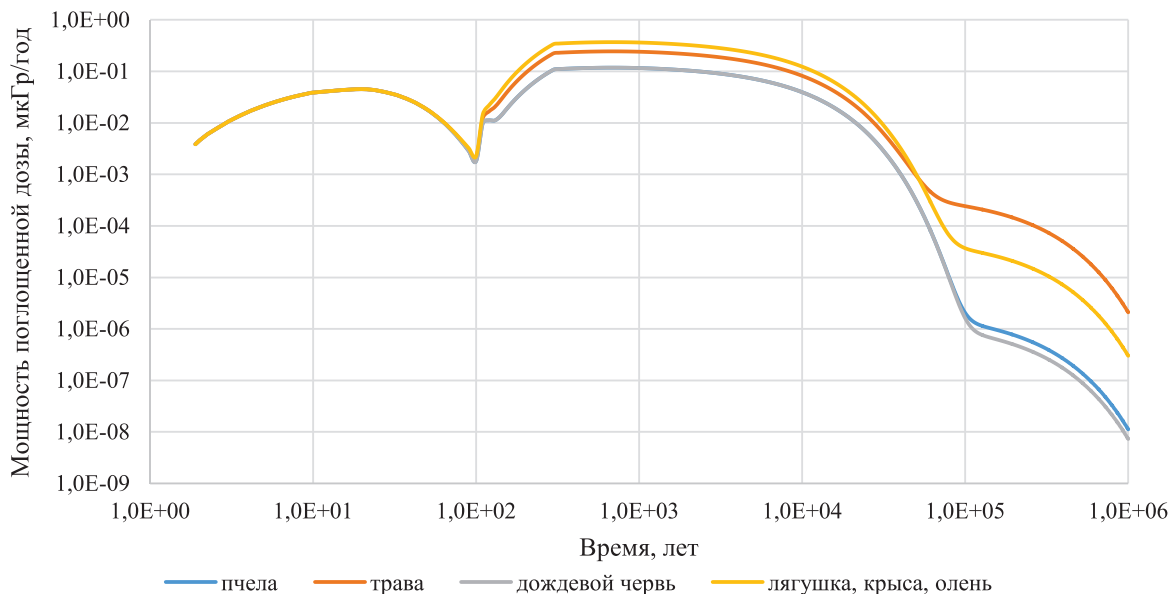


Рис. 2. Графики зависимости от времени мощности поглощенной дозы для выбранных референтных объектов биоты [Fig. 2. Time-dependence of absorbed dose rate for selected reference animals and plants]

на временном промежутке [$1 \cdot 10^0$, $1 \cdot 10^5$ лет] и становятся незначительно различимы на промежутке [$1 \cdot 10^5$, $1 \cdot 10^6$ лет].

Во-вторых, максимальное значение мощности поглощенной дозы достигается для референтных объектов биоты «лягушка», «мышь» и «олень» через 700 лет и составляет 0,37 мкГр/год, что значительно меньше принятого допустимого уровня облучения, составляющего 1 мГр/сут для объектов «олень» и «мышь» и 10 мГр/сут для объекта «лягушка» [12].

Заключение

В результате проведенного исследования были достигнуты следующие результаты:

- проведен анализ действующих российских законодательных и нормативных документов, регулирующих безопасность деятельности в области использования атомной энергии, в части обеспечения радиационной безопасности объектов окружающей среды при эксплуатации и выводе из эксплуатации ОИАЭ;

- рассмотрены методические рекомендации по оценке радиационного воздействия на представительные (референтные) объекты водной и наземной биоты, предложенные российскими и международными организациями в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности;

- на основании проведенного анализа методических рекомендаций разработана программа для ЭВМ, позволяющая проводить прогнозные оценки мощности поглощенной дозы облучения референтных объектов биоты на основе ожидаемых значений содержания радионуклидов в компонентах окружающей среды;

- проведен прогнозный расчет мощности доз облучения объектов биоты, обитающих в районе бывшей площадки ПУГР ЭИ-2, выведенного из эксплуатации по варианту захоронения на месте.

Полученные прогнозные оценки мощностей доз облучения объектов водной и наземной биоты на территории радиационного воздействия ПУГР ЭИ-2 оказались значительно меньше допустимых уровней облучения, принятых в российских и международных методических рекомендациях.

Литература

1. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements No. GSR Part 3. – IAEA, Vienna, 2014.
2. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 26. Ann. ICRP 1 (3), ICRP, 1977.
3. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1–3), ICRP, 1991.
4. Алексахин Р. М. Ядерная энергия и биосфера. – М.: Энергоиздат, 1982. – 216 с.
5. Sazykina T., Kryshev I. (2006). Radiation effects in wild terrestrial vertebrates – the EPIC collection. Journal of Environmental Radioactivity, vol. 88 (1), pp. 11–48.
6. Brown J. E., Alfonso B., Avila R., Beresford N. A., Copplestone D., Hosseini A. (2016). New version of the ERICA tool to facilitate impact assessments of radioactivity on wild plants and animals. Journal of Environmental Radioactivity, vol. 153, pp. 141–148.
7. A Framework for Assessing the Impact of Ionising Radiation on Non-human Species. ICRP Publication 91. Ann. ICRP 33 (3), ICRP, 2003.
8. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2–4). ICRP, 2007.
9. Environmental Protection – the Concept and Use of Reference Animals and Plants. ICRP Publication 108. Ann. ICRP 38 (4–6). ICRP, 2008.
10. Environmental Protection: Transfer Parameters for Reference Animals and Plants. ICRP Publication 114. Ann. ICRP 39 (6). ICRP, 2009.
11. Protection of the Environment under Different Exposure Situations. ICRP Publication 124. Ann. ICRP 43 (1). ICRP, 2014.
12. Dose Coefficients for Nonhuman Biota Environmentally Exposed to Radiation. ICRP Publication 136. Ann. ICRP 46 (2). ICRP, 2017.
13. Крышев И. И., Сазыкина Т. Г. Радиационная безопасность окружающей среды: необходимость гармонизации российских и международных нормативно-методических документов с учетом требований

федерального законодательства и новых международных основных норм безопасности ОНБ-2011 // Радиация и риск. 2013. Т. 22. № 1. С. 47–61.

14. Перечень нормативных правовых актов и нормативных документов, относящихся к сфере деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. П-01-01-2021. Раздел II: Государственное регулирование безопасности при использовании атомной энергии // Информационные материалы ФБУ «НТЦ ЯРБ». URL: https://docs.secnrs.ru/catalog/others/P_01_01_2021/?sphrase_id=56995 (дата обращения: 14.03.2023).

15. О разработке, установлении и пересмотре нормативов качества окружающей среды для химических и физических показателей состояния окружающей среды, а также об утверждении нормативных документов в области охраны окружающей среды, устанавливающих технологические показатели наилучших доступных технологий: Постановление Правительства Российской Федерации от 13.02.2019 № 149.

16. О федеральной целевой программе «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года»: Постановление Правительства Российской Федерации от 13.07.2007 № 444.

17. О федеральной целевой программе «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года»: Постановление Правительства Российской Федерации от 19.11.2015 № 1248.

18. Федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года». URL: <http://www.fcp-radbez.ru/> (дата обращения: 14.03.2023).

19. Рекомендации Р 52.18.820-2015. Оценка радиационно-экологического воздействия на объекты природной среды по данным мониторинга радиационной обстановки: утв. приказом Минприроды России от 26.05.2015 № 316.

20. Рекомендации Р 52.18.852-2016. Порядок расчета контрольных уровней содержания радионуклидов в морских водах: утв. приказом Минприроды России от 08.09.2016 № 415.

21. Рекомендации Р 52.18.853-2016. Порядок расчета контрольных уровней содержания радионуклидов в пресной воде и почве: утв. приказом Минприроды России от 08.09.2016 № 415.

22. Научно-техническое пособие по подготовке обосновывающих материалов для принятия решения об отнесении радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам. Версия 2 / Под общей ред. И. И. Линге. – М.: Комтехпринт, 2014. – 157 с.

23. Практические рекомендации по вопросам оценки радиационного воздействия на человека и биоту / Под общей ред. И. И. Линге, И. И. Крышева. – М.: Фонд экологической безопасности энергетики, 2015. – 265 с.

24. Казаков С. В., Уткин С. С. Подходы и принципы радиационной защиты водных объектов / под ред. И. И. Линге; ИБРАЭ РАН. – М.: Наука, 2008. – 318 с.

25. Бодров О. В., Кузнецов В. Н., Муратов О. Э., Талевлин А. А. Обращение с графитом при выводе из эксплуатации реакторов РБМК: доклад // Санкт-Петербург – Челябинск – Висагинас: Общественный Совет Южного Берега Финского Залива, 2019.

26. Талицкая А. В., Захарова Е. В., Андрющенко Н. Д., Бочкарев В. В. Оценка долговременной безопасности объекта окончательной изоляции радиоактивных отходов, создаваемого при выводе из эксплуатации промышленного уран-графитового реактора // Ядерная и радиационная безопасность. 2017. № 2 (84). С. 54–61.

27. Co-ordinated Research Program on the Safety Assessment of Near Surface Radioactive Waste Disposal Facilities. Specification for Test Case 2c. IAEA, NSARS, 1995.

28. Bradbury M. H., Sarott F.-A. Sorption Databases for the Cementitious Near-Field of a L/ILW Repository for Performance Assessment. Paul Scherrer Inst. (PSI), Switzerland, 1995.

29. Материалы обоснования лицензии на осуществление деятельности в области использования атомной энергии // Официальный интернет-сайт АО «ОДЦ УГР». URL: http://одцугр.пф/wp-content/uploads/2020/10/mol_tom-2_ovos-hranilishha.pdf (дата обращения 14.03.2023).

30. Опыт работы АО «ОДЦ УГР» по выводу из эксплуатации уран-графитовых реакторов: презентация // Официальный интернет-сайт VII Международного Форума «АТОМЭКСПО 2015». URL: <http://www.2015.atomexpo.ru/mediafiles/u/files/materials/6/Izmostiev.pdf> (дата обращения 14.03.2023).

31. Савкин М. Н., Ведерникова М. В., Панченко С. В. Взаимное влияние объектов живой природы и пунктов захоронения радиоактивных отходов: экологическая и техническая безопасность // Радиоактивные отходы. 2018. № 3 (4). С. 30–38.

32. Туктаров М. А. Кондиционирование реакторного графита выводимых из эксплуатации уран-графитовых реакторов для целей захоронения / М. А. Туктаров, Л. А. Андреева, А. А. Роменков // Научный портал «Атомная энергия 2.0». URL: <http://www.atomic-energy.ru/articles/2016/06/08/66585> (дата обращения: 14.03.2023).

33. Аттестационный паспорт программы для ЭВМ «Ecolego 6» от 30.05.2019, пер. № 471.

References

1. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements No. GSR Part 3, IAEA, Vienna, 2014.
2. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 26. Ann. ICRP 1 (3), ICRP, 1977.
3. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1–3), ICRP, 1991.
4. Aleksakhin R. M. (1982). Yadernaya ehnergiya i biosfera [Nuclear energy and the biosphere]. Moscow: Energoizdat. [in Russian].
5. Sazykina T., Kryshev I. (2006). Radiation effects in wild terrestrial vertebrates – the EPIC collection. Journal of Environmental Radioactivity, vol. 88 (1), pp. 11–48.
6. Brown J. E., Alfonso B., Avila R., Beresford N. A., Copplestone D., Hosseini A. (2016). New version of the ERICA tool to facilitate impact assessments of radioactivity on wild plants and animals. Journal of Environmental Radioactivity, vol. 153, pp. 141–148.
7. A Framework for Assessing the Impact of Ionising Radiation on Non-human Species. ICRP Publication 91. Ann. ICRP 33 (3), ICRP, 2003.
8. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2–4). ICRP, 2007.
9. Environmental Protection – the Concept and Use of Reference Animals and Plants. ICRP Publication 108. Ann. ICRP 38 (4–6). ICRP, 2008.
10. Environmental Protection: Transfer Parameters for Reference Animals and Plants. ICRP Publication 114. Ann. ICRP 39 (6). ICRP, 2009.
11. Protection of the Environment under Different Exposure Situations. ICRP Publication 124. Ann. ICRP 43 (1). ICRP, 2014.
12. Dose Coefficients for Nonhuman Biota Environmentally Exposed to Radiation. ICRP Publication 136. Ann. ICRP 46 (2). ICRP, 2017.
13. Kryshev I. I., Sazykina T. G. (2013). Radiatsionnaya bezopasnost' okruzhayushchei sredy: neobkhodimost' garmonizatsii rossiiskikh i mezhdunarodnykh normativno-metodicheskikh dokumentov s uchetom trebovaniy federal'nogo zakonodatel'stva i novykh mezhdunarodnykh osnovnykh norm bezopasnosti ONB-2011 [Radiation safety of the environment: request for harmonization of Russian and international regulation documents with consideration of federal laws and new international basic safety standards]. Radiatsiya i risk – Radiation and Risk, V. 22, No. 1, pp. 47–61. [in Russian].
14. Perechen' normativnykh pravovykh aktov i normativnykh dokumentov, odnosyashchikhsya k sfere deyatel'nosti Federal'noi sluzhby po ehkologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru. P-01-01-2021. Razdel II: Gosudarstvennoe regulirovanie bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoi ehnergii [The list of regulatory legal acts and regulatory documents relating to the activity of the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service of Russia: section II “State safety regulation in atomic energy use”]. Informatsionnye materialy FBU “NTTS YARB” – SEC NRS informational materials. URL: https://docs.secncs.ru/catalog/others/P_01_01_2021/?sphrase_id=56995 (reference date: 14.03.2023).
15. Postanovlenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii No. 149 “O razrabotke, ustanovlenii i peresmotre normativov kachestva okruzhayushchei sredy dlya khimicheskikh i fizicheskikh pokazatelei sostoyaniya okruzhayushchei sredy, a takzhe ob utverzhdenii normativnykh dokumentov v oblasti okhrany okruzhayushchei sredy, ustanavlivayushchikh tekhnologicheskie pokazateli nailuchshikh dostupnykh tekhnologii” [Decree No. 149 of the Government of the Russian Federation “On the development, establishment and revision of environmental quality standards for chemical and physical indicators of the state of the environment, as well as on the approval

of regulatory documents in the field of environmental protection that establish technological indicators of the best available technologies”]. 2019.

16. Postanovlenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii No. 444 “O federal'noi tselevoi programme “Obespechenie yadernoi i radiatsionnoi bezopasnosti na 2008 god i na period do 2015 goda” [Decree No. 444 of the Government of the Russian Federation “On the federal target program “Ensuring nuclear and radiation safety for 2008 and for the period up to 2015”]. 2007.

17. Postanovlenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii No. 1248 “O federal'noi tselevoi programme “Obespechenie yadernoi i radiatsionnoi bezopasnosti na 2016–2020 gody i na period do 2030 goda” [Decree No. 1248 of the Government of the Russian Federation “On the federal target program “Ensuring nuclear and radiation safety for 2016–2020 and for the period up to 2030”]. 2015.

18. Federal'naya tselevaya programma “Obespechenie yadernoi i radiatsionnoi bezopasnosti na 2008 god i na period do 2015 goda” [The federal target program “Ensuring nuclear and radiation safety for 2008 and for the period up to 2015”]. URL: <http://www.fcp-radbez.ru> (reference date: 14.03.2023).

19. Rekomendatsii R 52.18.820-2015. Otsenka radiatsionno-ekologicheskogo vozdeistviya na ob"ekty prirodnoi sredy po dannym monitoringa radiatsionnoi obstanovki: utv. prikazom Minprirody Rossii No. 316 [Recommendations R 52.18.820-2015. Assessment of radiation and environmental impacts on natural environment based on radiation monitoring data. Approved by the order of Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation No. 316]. 2015.

20. Rekomendatsii R 52.18.852-2016. Poryadok rascheta kontrol'nykh urovnei sodержaniya radionuklidov v morskikh vodakh: utv. prikazom Minprirody Rossii No. 415 [Recommendations R 52.18.852-2016. The procedure for calculating the control of levels of radionuclides in sea waters. Approved by the order of Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation No. 415]. 2016.

21. Rekomendatsii R 52.18.853-2016. Poryadok rascheta kontrol'nykh urovnei sodержaniya radionuklidov v presnoi vode i pochve: utv. prikazom Minprirody Rossii No. 415 [Recommendations R 52.18.853-2016. Guidelines for calculating reference levels of radionuclide content in fresh water and soil. Approved by the order of Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation No. 415]. 2016.

22. Linge I. I. (Ed.). (2014). Nauchno-tehnicheskoe posobie po podgotovke obosnovyvyayushchikh materialov dlya prinyatiya resheniya ob otnesenii radioaktivnykh otkhodov k osobym radioaktivnym otkhodam [Scientific and technical manual on the preparation of substantiating materials for making a decision on classifying radioactive waste as special radioactive waste]. Version 2. Moscow: Comtechprint. 157 p. [in Russian].

23. Linge I. I., Kryshev I. I. (Eds.). (2015). Prakticheskie rekomendatsii po voprosam otsenki radiatsionnogo vozdeistviya na cheloveka i biotu [Practical recommendations on the assessment of radiation effects on humans and biota]. Moscow: Energy Environmental Safety Foundation. 265 p. [in Russian].

24. Kazakov S. V., Utkin S. S. (2008). Podkhody i printsipy radiatsionnoi zashchity vodnykh ob"ektov [Approaches and principles of radiation protection of water bodies]. I. I. Linge (Ed.), IBRAE RAN. Moscow: Nauka. 318 p. [in Russian].

25. Bodrov O. V., Kuznetsov V. N., Muratov O. E., Talevlin A. A. (2019). Obrashchenie s grafitom pri vyvode iz ehkspluatatsii reaktorov RBMK [Graphite handling during decommissioning of RBMK reactors. Report]. St. Petersburg – Chelyabinsk – Visaginas: Public Council of the Southern Shore of the Gulf of Finland. [in Russian].

26. Talitskaya A. V., Zakharova E. V., Andryushchenko N. D., Bochkarev V. V. (2017). Otsenka dolgovremennoi bezopasnosti ob"ekta okonchatel'noi izolyatsii radioaktivnykh otkhodov, sozdavaemogo pri vyvode iz ehkspluatatsii promyshlennogo uran-grafitovogo reaktora [Long-term safety assessment of radioactive waste disposal facility formed during decommissioning uranium-graphite production reactor]. Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety Journal, No. 2 (84), pp. 54–61. [in Russian].

27. Co-ordinated Research Program on the Safety Assessment of Near Surface Radioactive Waste Disposal Facilities. Specification for Test Case 2c. IAEA, NSARS, 1995.

28. Bradbury M. H., Sarott F.-A. (1995). Sorption Databases for the Cementitious Near-Field of a L/ILW Repository for Performance Assessment. Paul Scherrer Inst. (PSI), Switzerland.

29. Materialy obosnovaniya litsenzii na osushchestvlenie deyatel'nosti v oblasti ispol'zovaniya atomnoi ehnergii [Materials of justification of the license to carry out activities in the field of nuclear energy use]. Ofitsial'nyi internet-sait AO “ODTS UGR” – Official website of JSC “PDC UGR”. URL: http://odtugr.pф/wp-content/uploads/2020/10/mol_tom-2_ovos-hranilishha.pdf (reference date: 14.03.2023).

30. Opyt raboty AO "ODTS UGR" po vyvodu iz ehkspluatatsii uran-grafitovykh reaktorov [Work experience of "PDC UGR" on decommissioning of uranium-graphite reactors: presentation]. Ofitsial'nyi internet-sait VII Mezhdunarodnogo Foruma "ATOMENKSP0 2015" – Official website of VII International Forum "ATOMEXPO 2015". URL: <http://www.2015.atomexpo.ru/mediafiles/u/files/materials/6/Izместiev.pdf> (reference date: 14.03.2023).

31. Savkin M. N., Vedernikova M. V., Panchenko S. V. (2018). Vzaimnoe vliyanie ob"ektov zhivoi prirody i punktov zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov: ehkologicheskaya i tekhnicheskaya bezopasnost' [Mutual influence of wildlife objects and radioactive waste disposal sites: environmental and technical safety]. Radioaktivnye otkhody – Radioactive Waste, No. 3 (4), pp. 30–38. [in Russian].

32. Tuktarov M. A., Andreeva L. A., Romenkov A. A. Konditsionirovanie reaktornogo grafita vyvodimykh iz ehkspluatatsii uran-grafitovykh reaktorov dlya tselei zakhoroneniya [Reactor graphite conditioning of decommissioned uranium-graphite reactors for disposal purposes]. Nauchnyi portal "Atomnaya ehnergiya 2.0" – Scientific portal "Atomic Energy 2.0". URL: <http://www.atomic-energy.ru/articles/2016/06/08/66585> (reference date: 14.03.2023).

33. Attestatsionnyi pasport programmy dlya EHVM "Ecolego 6" ot 30.05.2019, reg. No. 471 ["Ecolego 6" software certificate no. 471 of 30.05.2019]. 2019.

Сведения об авторах

Плотников Денис Алексеевич, научный сотрудник отдела радиационной безопасности, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Мишагина Анна Сергеевна, научный сотрудник отдела безопасности предприятий топливного цикла, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Щадилов Анатолий Евгеньевич, заместитель начальника отдела радиационной безопасности, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Authors credentials

Plotnikov Denis Alekseevich, Researcher of Radiation Safety Division, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: plotnikov@secnrs.ru.

Mishagina Anna Sergeevna, Researcher of Division for Safety of Fuel Cycle Facilities, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: mishagina@secnrs.ru.

Schadilov Anatoliy Evgenevich, Deputy Head of Radiation Safety Division, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: schadilov@secnrs.ru.

Для цитирования

Плотников Д. А., Мишагина А. С., Щадилов А. Е. Прогнозная оценка радиационного воздействия источников ионизирующего излучения на объекты окружающей среды после вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии // Ядерная и радиационная безопасность. 2023. № 1 (107). С. 39–50. DOI: 10.26277/SECNRS.2023.107.1.004.

For citation

Plotnikov D. A., Mishagina A. S., Schadilov A. E. Forecast assessment of the radiation impact of ionizing radiation sources on the environment after decommissioning of nuclear facilities. Nuclear and Radiation Safety Journal, 2023, No. 1 (107), pp. 39–50. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2023.107.1.004.