

УДК: 621.039

DOI: 10.26277/SECNRS.2023.109.3.003

© 2023. Все права защищены.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗМЕРОВ ЗОН ПЛАНИРОВАНИЯ ЗАЩИТНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ДЛЯ ДВУХ ГИПОТЕТИЧЕСКИХ РАДИАЦИОННЫХ АВАРИЙ

Киселев А. А.*, канд. техн. наук (aak@ibrae.ac.ru)

Статья поступила в редакцию 10 июля 2023 г.

Аннотация

В статье рассматриваются практические вопросы моделирования размеров зон планирования защитных мероприятий на АЭС на основе требований российских нормативных документов и рекомендаций МАГАТЭ. Рассмотрены результаты расчетов атмосферного переноса и доз облучения населения для двух аварий из проекта: аварии с вероятностью 10^{-7} в год и тяжелой запроектной аварии с величиной выброса на уровне между Чернобыльской аварией и аварией на АЭС «Фукусима-1». Показано, что размеры зон планирования для первой лежат в пределах требований к проекту. При отказе от ограничения на вероятность аварии размеры зон планирования становятся сопоставимыми с предлагаемыми МАГАТЭ размерами. Избыточная консервативность в методиках в части учитываемых путей облучения, приближений по оценке доз острого облучения, а также метеорологического фактора в ряде случаев приводит к значительному увеличению размеров зон планирования, что требует их адаптации при работе в нормативном поле, где предусмотрен анализ опасностей в соответствии с рекомендациями GSR-7 МАГАТЭ.

► **Ключевые слова:** зона аварийного планирования, расстояние аварийного планирования, атмосферный перенос, радионуклиды, аварии, АЭС.

* Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН), Москва, Россия.

COMPARATIVE ANALYSIS OF PROTECTIVE ACTION PLANNING ZONES FOR TWO HYPOTHETICAL RADIATION ACCIDENTS

Kiselev A. A.*, Ph. D.

Article is received on July 10, 2023.

Abstract

The paper addresses the practical issues of modeling the sizes of emergency planning zones around NPP based on the requirements of the Russian regulatory documents and IAEA recommendations. The results of calculations of the atmospheric transfer and radiation doses to members of the public have been considered for two accident scenarios taken from the design documentation: a beyond design basis accident with a probability of 10^{-7} per year, and a severe beyond design basis accident with a release that can be rated between the Chernobyl accident and the accident at the Fukushima-1 NPP. It has been shown that the emergency planning zones sizes for the first accident correspond to the requirements for the NPP design. Without restrictions on the accident probability, the size of the emergency planning zones becomes comparable to the IAEA recommendations. An excessive conservatism in exposure pathways, approximations for acute radiation doses, and a weather factor lead, in some cases, to a significant increase in the size of emergency planning zones and emergency planning distances, which requires their adaptation while acting in the regulatory field, where the hazard analysis is adopted in compliance with the recommendations of the IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 7.

► **Keywords:** *emergency planning zones, emergency planning distances, atmospheric transfer, radionuclides, accidents, NPP.*

* Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (IBRAE RAN), Moscow, Russia.

Введение

В настоящее время принципы аварийного зонирования территорий, в соответствии с нормативными документами Российской Федерации (РФ), отличаются от принципов, предложенных Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ). Во многих странах нормативные требования по аварийному зонированию основаны на принципах МАГАТЭ, в том числе в странах, где строятся атомные электростанции (АЭС) по отечественным проектам. Лицензионная база таких проектов содержит как российские нормативные документы, так и национальные. Это приводит к неоднозначности требований к определению и обоснованию размеров зон планирования защитных мероприятий. В РФ актуальность этой проблемы также связана с необходимостью гармонизации нормативной базы в области радиационной безопасности, в том числе и для аварийного зонирования. Вопросы гармонизации стандартов безопасности и соответствующие проблемы, связанные с нормативно-правовой базой, широко рассмотрены в работах [1, 2], однако практическое применение методов расчета требует отдельного анализа, что связано с используемыми в методиках приближениями.

Зонирование территорий является важнейшим требованием обеспечения безопасности населения в случае возникновения тяжелых запроектных аварий на АЭС и позволяет оперативно реализовать меры по защите населения адекватно уровню опасности.

Принципы обеспечения радиационной безопасности определены в основополагающих документах РФ [3] и международных стандартах безопасности [4]. В частности, в статье 19 [3] определена обязанность организаций, в которых возможно возникновение радиационных аварий, иметь планы мероприятий по защите работников (персонала) и населения от радиационной аварии и ее последствий. Такие планы для АЭС предполагают наличие выделенных зон планирования защитных мероприятий (пункты 5.9 и 5.38 [4], статья 11.3.2 СП-АС-03 [5]). Как правило, установление таких зон опирается на применение кодов для моделирования процессов от исходного события до доз на население. Начиная с МПА-98 [6] для анализов используется метод огибающих, который развивался в работах российских и зарубежных ученых и нашел свое применение в ряде кодов, таких как RiskZone [7], JRODOS [8], POM [9], VALMA [10] и других. Тем не менее, несмотря на большое число инструментов, принципы их практического использования не до конца определены,

а результат расчета в значительной мере зависит от выбора исходных данных и допущений.

Размеры зоны планирования защитных мероприятий могут быть установлены на основе результатов расчетов или на уровне требований к проекту, в частности на основе рекомендаций EUR [11] или МАГАТЭ [12]. Отметим, что EUR или МАГАТЭ используют разные подходы к определению представительных аварий. В основу методики EUR положен вероятностный принцип определения круга тяжелых аварий, подлежащих рассмотрению. Учитывая аварии с вероятностью возникновения 10^{-7} и выше, EUR рекомендует устанавливать зоны размерами: 800 м (критерий – за пределами не должны достигаться значения доз облучения, при которых может потребоваться эвакуация или отселение населения) и 3 км (за пределами не потребуется временное переселение населения). При обосновании безопасности проекта должно быть подтверждено, что достигнуты целевые ориентиры безопасности на установленных уровнях вероятности возникновения аварий, которые не могут приводить к превышению прогнозируемых доз облучения на границах планирования защитных мероприятий. МАГАТЭ [4] использует принцип анализа опасностей и обеспечения эффективного аварийного реагирования на разумно прогнозируемые события (в том числе события с весьма низкой вероятностью возникновения). С учетом этого, для легководных установок мощностью от 1 000 МВт МАГАТЭ установило [12]: зону предупредительных мер (ЗПМ) на расстояниях 3–5 км, зону планирования срочных защитных мер (ЗПСМ) на расстояниях 15–30 км, расстояние (радиус зоны) расширенного планирования (РПП) в 100 км и расстояние (радиус зоны) планирования мер в отношении продуктов питания и товаров (РППТ) в 300 км. В РФ, в соответствии с СП-АС-03 [5], должны быть определены и обоснованы зона планирования защитных мероприятий (ЗПЗМ) и зона планирования мероприятий по обязательной эвакуации (ЗПМОЭ) населения в случае возникновения запроектных аварий, размеры которых обычно устанавливаются на уровне проекта с учетом требований EUR [11]. Одновременно существуют рекомендации РБ-094-14 [13], которые формируют новые принципы установления зон планирования защитных мероприятий на основе рекомендаций МАГАТЭ в комбинации с действующими в РФ основными пределами доз.

Очевидно, что сопоставимые по предпринимаемым мерам зоны EUR [11] и МАГАТЭ [12] несопоставимы по размерам, что определяется разными

представительными авариями. Однако представляет интерес сравнить две российские методики в их практическом приложении к зонированию, а также подход МАГАТЭ с учетом оригинальных рекомендаций по расчету доз.

С учетом изложенного, в рамках настоящей работы представлены результаты численных экспериментов по расчету зон планирования защитных мероприятий на основе двух аварий: аварии с вероятностью 10^{-7} (принятый в [14] уровень вероятности для большого аварийного выброса) и тяжелой запроектной аварии с величиной выброса между аварией на АЭС «Фукусима-1» и Чернобыльской АЭС. Первая авария может рассматриваться как представительная для подхода EUR [11], вторая – для методологии МАГАТЭ [12]. В расчетах учтены требования нормативных документов различного уровня.

Данные результаты получены, в том числе, в рамках деятельности в проекте координированных исследований J15002 МАГАТЭ по эффективному использованию прогностических инструментов для обеспечения готовности и реагирования на ядерные и радиологические аварийные ситуации. С учетом специфики задачи и уровня детализации расчетов в качестве объекта исследования была взята условная АЭС с типовыми характеристиками без привязки к реально существующим объектам. Следует отметить, что полученные расчетные размеры зон аварийного планирования являются предварительными. Окончательное установление границ аварийных зон выполняется с учетом географических ориентиров [12] (в частности дорог, административных границ, рек и т. д.). Возможные принципы такого моделирования зон аварийного планирования рассмотрены, например, в [15].

Методы

Оценка параметров радиологической обстановки, необходимых для определения размеров зон аварийного планирования, выполнялась с использованием метода огибающих [16]. Для этого был выбран 5-летний временной интервал с 2017 по 2021 гг. На рис. 1 представлены картограммы орографии и подстилающей территории, взятые для расчетов.

Для выбранного периода были выполнены серии расчетов дозовых характеристик облучения населения, для которых установлены дозовые пределы и которые используются в определении соответствующих зон аварийного планирования (ниже представлены основные модельные допущения).

Серия расчетов для каждой аварии формируется путем сдвига времени начала постулируемого выброса по метеорологической шкале с сохранением последовательности метеорологических фаз. Для их построения в настоящей работе использовалась региональная численная модель прогноза погоды WRF (Weather Research & Forecasting Model), обеспечивающая возможность применения кода на расстояниях порядка сотен километров [17]. В результате были получены четырехмерные (трехмерные по пространству плюс время) поля с метеорологическими параметрами (поля ветра, коэффициенты диффузии, температура, давление и т. д.) за 2017–2021 гг. с разрешением 1 час и пространственным разрешением 667 м в 15-км области, 2 км в 100-км области и 18 км на расстояниях более 100 км от условной АЭС. Моделирование атмосферного переноса выполнялось с использованием программного средства SOPRO [18], разработанного на базе аттестованных моделей кода НОСТРАДАМУС. Модели кода НОСТРАДАМУС обеспечивают решение уравнения адвекции диффузии в нестационарном поле метеорологических параметров. В программном средстве SOPRO моделируется расширенный набор путей облучения с учетом рекомендаций МАГАТЭ, используется актуальное константное обеспечение [18], а также реализована полноценная связка с региональной моделью прогноза погоды для расчетов по многолетним метеорологическим данным. За счет внедрения технологий распределенных вычислений в SOPRO обеспечена возможность проведения расчета с использованием кластерных вычислительных установок, что позволяет решать задачу вариантного анализа в разумные временные сроки.

В результате расчетов было сформировано 21 925 вариантов прогнозов доз облучения, по которым построены огибающие с уровнем обеспеченности 95 % [19] и средние (среднеклиматические условия в случае применения метода огибающих не определены, поэтому взята ближайшая оценка – средние по серии расчетов значения доз), которые сравнивались с соответствующими дозовыми пределами, установленными в нормативных документах.

В модели зонирования на основе РБ-094-14 [13] рассчитываются размеры для четырех зон с номерами 1–4. Для зоны 1 в качестве целевых функционалов принимается поглощенная доза на: все тело (красный костный мозг) [20] (порог 1 Гр за 2 суток), легкие (порог 6 Гр за 2 суток), кожу (порог 3 Гр за 2 суток), щитовидную железу (порог 5 Гр за 2 суток), гонады (порог 3 Гр за 2 суток), плод (порог 0,1 Гр

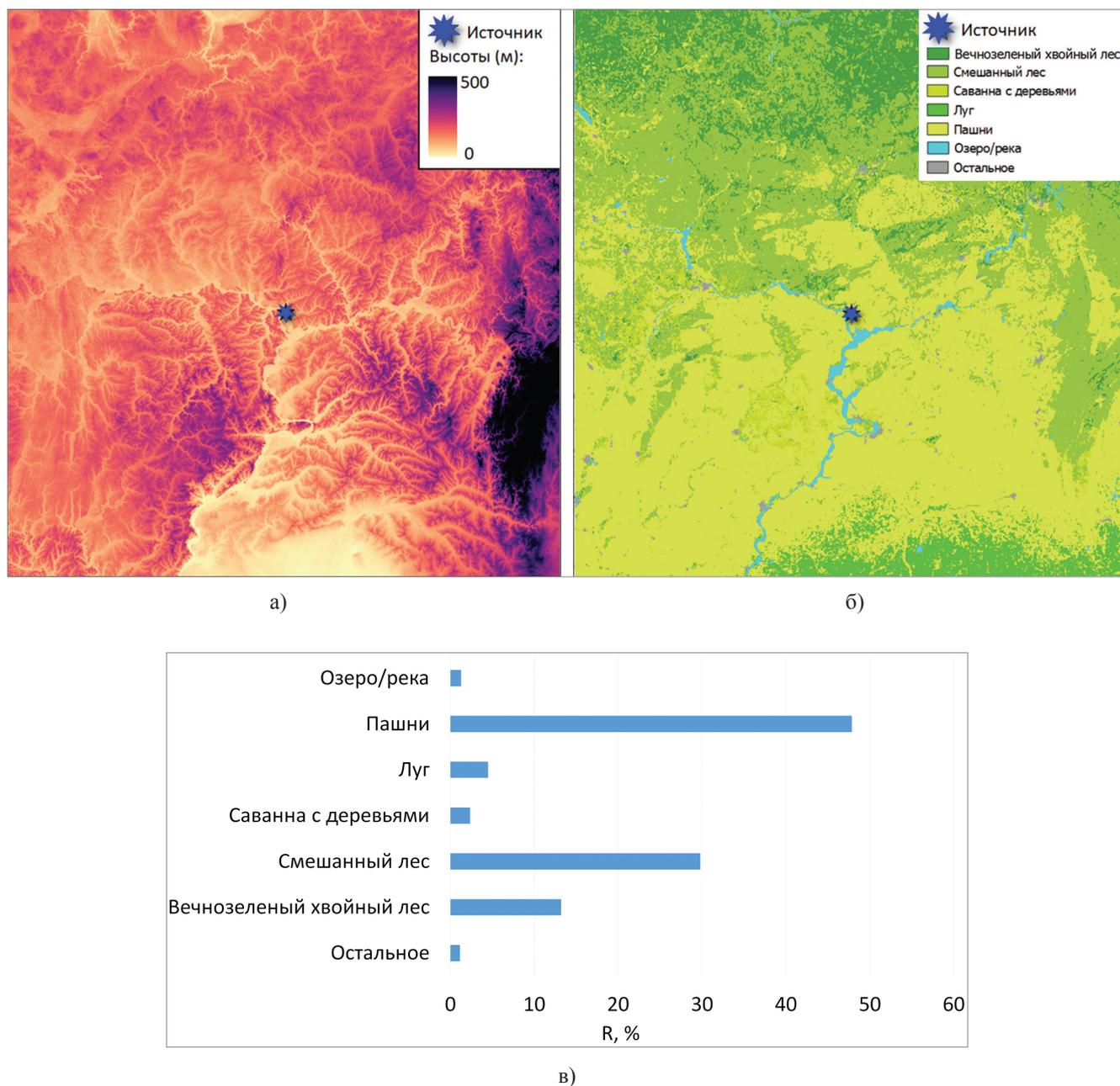


Рис. 1. Орография (а), типы подстилающей поверхности (б) и распределение категорий земель по данным MODIS (в) в области моделирования [Fig. 1. Orography (a), types of underlying terrain (b) and distribution of land categories according to MODIS data (c) in the modeling area]

за 2 суток, если учитывается внутреннее облучение, то для плода оно рассчитывается за период внутриутробного развития [21]). Для зоны 2 используется доза на все тело (порог 100 мЗв за 10 суток, вместо поглощенной рассматривается эффективная доза [13], учитывается требование, что внешнее облучение от поверхностных выпадений формируется в течение суток). В соответствии с РБ-094-14 [13] для зон 1 и 2 учитываются внешнее облучение от радиоактивного облака, внешнее облучение от поверхностных выпадений радионуклидов, внутреннее облучение за счет ингаляционного поступления радионуклидов. Для зоны 2 дозы

рассчитываются в предположении, что проведены йодная профилактика и укрытие, то есть доза на щитовидную железу (а также ее вклад в эффективную дозу) редуцированы с коэффициентом 0,036; ингаляционная доза, доза внешнего облучения от проходящего облака и доза внешнего облучения от подстилающей поверхности редуцированы с учетом множителей 0,5, 0,6 и 0,4, соответственно. Для расчета размеров зон 3 и 4 используется эффективная доза (порог 100 мЗв) по всем путям облучения, включая повторное взвешивание, без поступления радионуклидов с продуктами питания местного производства (зона 3) и с учетом продуктов питания

(зона 4). Поскольку в РБ-094-14 [13] отсутствует информация о принципах использования метеорологических данных, то будем руководствоваться нормативным документом более высокого уровня НП-006-16 [19], согласно которому для запроектных аварий дозы должны быть рассчитаны с уровнем обеспеченности 95 %. Следует отметить, что документ предполагает использование наибольшего возможного выброса из всех рассмотренных при анализе тяжелых запроектных аварий, то есть предусмотрен уход от концепции вероятности. Все дозы рассчитываются для шести возрастных групп, по результатам берется максимум.

Модель зонирования на основе МТ 1.2.5.05.0110-2012 [22] опирается на результаты расчета доз облучения для средноклиматических метеорологических условий. Для ЗПМОЭ рассматриваются поглощенная доза во всем теле за 10 суток (порог – 500 мГр), поглощенная доза в легких за 10 суток (порог – 5 000 мГр), поглощенная доза в коже за 10 суток (порог – 5 000 мГр), поглощенная доза в щитовидной железе за 10 суток (порог – 5 000 мГр). Для ЗПЗМ рассматриваются поглощенная доза во всем теле за 10 суток (порог – 5 мГр), поглощенная доза в легких за 10 суток (порог – 50 мГр), поглощенная доза в коже за 10 суток (порог – 50 мГр), поглощенная доза в щитовидной железе за 10 суток (порог – 50 мГр). Для обеих зон учитываются внешнее облучение от облака и поверхностных выпадений, а также ингаляционный путь (кроме поглощенной дозы во всем теле [22]). При расчете доз облучения от загрязненной поверхности учитывается, что человек находится на открытой местности неполный день (множитель 0,4).

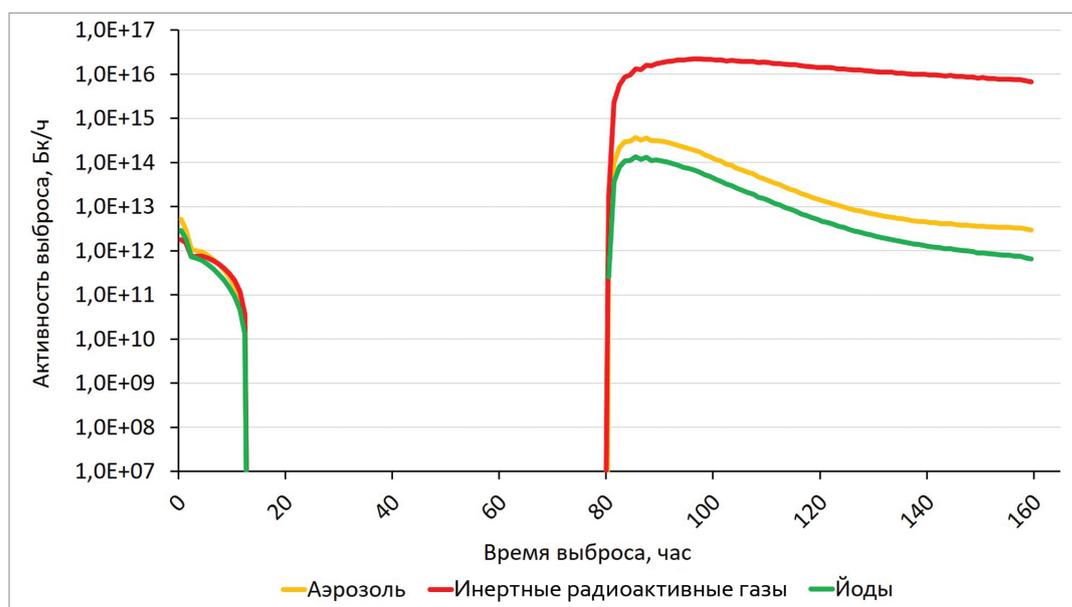
Модель зонирования на основе рекомендаций МАГАТЭ [12], так же как и модель на основе МТ 1.2.5.05.0110-2012 [22], предполагает использование средних метеорологических условий. В документе [12] в качестве средних условий рассматривается класс устойчивости атмосферы *D* по Паскуиллу. В данной работе учитываются особенности расположения площадки, поэтому принимаем в качестве средних условий средние прогнозируемые последствия по серии расчетов. Для ЗПМ рассчитываются: ОБЭ-взвешенная (ОБЭ – относительная биологическая эффективность) доза на плод (порог 1 Гр) за счет ингаляции и ОБЭ-взвешенная доза на красный костный мозг (порог 1 Гр) за счет ингаляции (период реализации 30 суток), дозы от проходящего облака и дозы от выпадений радионуклидов за 1 сутки. Для ЗПСМ рассчитывается эффективная доза (порог 100 мЗв) за счет ингаляции, а также эквивалентная

доза на плод (порог 100 мЗв) за счет ингаляции. Размеры ЗПМ и ЗПСМ рассчитываются с учетом защитных мероприятий (укрытие и йодная профилактика) для больших и малых зданий, что определяет диапазон получаемых расстояний за счет различных факторов защиты. Предполагается, что на период выброса и после него люди укрываются в домах, а йодная профилактика проводится до прихода радиоактивного облака или в течение одного-двух часов после. Для учета йодной профилактики используется защитный коэффициент 0,1. Для укрытия вводятся коэффициенты: 0,5 (0,2) для ингаляции, 0,6 (0,3) для облучения от проходящего облака и 0,4 (0,02) для облучения от загрязненной поверхности. Значения приведены для укрытия в доме, в скобках – для укрытия в большом здании [12]. Разница в факторах защиты для различных типов зданий определяет минимальное и максимальное расстояния до границ зон. Для РРП и РППТ рассчитываются эффективная доза (порог 100 мЗв) и эквивалентная доза на плод (порог 100 мЗв) по всем путям облучения без учета потребления продуктов питания местного производства (РРП) и с учетом РППТ, соответственно. Все дозы вычисляются для репрезентативного человека с учетом определения, представленного в рекомендациях МАГАТЭ [23].

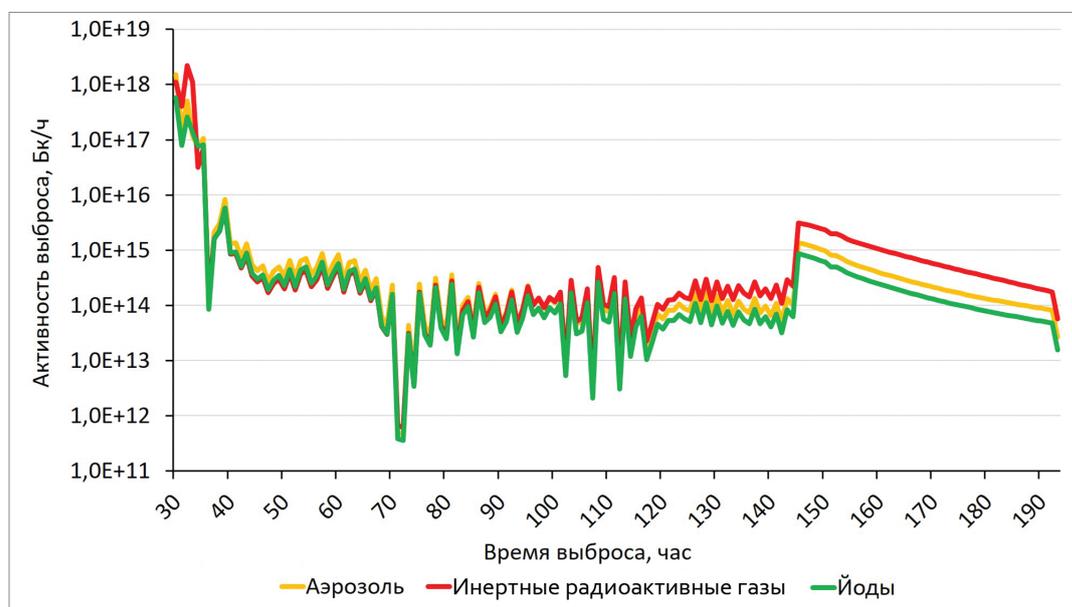
Во всех расчетах используются актуальные дозовые коэффициенты с учетом подходов [24, 25]. В дозовых коэффициентах по внешнему облучению использованы поправочные множители для учета возрастных отличий различных групп населения [22, 26]. Перечень путей облучения при проведении расчетов, если не отмечено иное, включает пути, рекомендованные МАГАТЭ [23] (облучение от проходящего облака: внешнее гамма-излучение, ингаляция, осаждение на кожу; облучение от выпавших на подстилающую поверхность радионуклидов: внешнее гамма-излучение, ресуспензия, облучение от попадания радионуклидов на кожу, непреднамеренное заглатывание). Облучение за счет потребления продуктов питания местного производства учитывается в соответствии с моделями аттестованного кода РОМ [9].

Результаты и обсуждение

Для расчета зон аварийного планирования использовались выбросы, рассчитанные по коду СОКРАТ/В3 [27] для аварий на реакторной установке с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР). На рис. 2 приведена динамика выброса групп радионуклидов в зависимости от времени.



а)



б)

Рис. 2. Расчетная динамика выброса радиоактивных веществ в атмосферу в результате аварий на реакторной установке с ВВЭР: с вероятностью возникновения 10^{-7} (а), тяжелой запроектной аварии (б)
 [Fig. 2. Calculated dynamics of release of radioactive substances into the atmosphere due to the accidents at a VVER-type reactor: with a probability of occurrence of 10^{-7} (a), a severe beyond design basis accident (b)]

В силу того, что аварии носят длительный по времени характер, ко всем рассчитываемым функционалам была добавлена продолжительность выброса исходя из принципа консервативности оценок и с учетом того, что под многими функционалами понимается время прохождения облака.

Для аварии с вероятностью возникновения 10^{-7} получено, что превышение дозовых пределов отсутствует (таблица № 1). Исключение составляет зона РППТ (МАГАТЭ [12]), для которой на расстояниях до 8,3 км средние дозы на плод могут быть превышены. То есть рассмотренный проект, который

допускает такую аварию с вероятностью 10^{-7} с точки зрения прогнозируемых доз, соответствует требованиям к проекту EUR [11].

Рассмотрим результаты расчета размеров зон планирования для целей анализа опасности. Для этого будем использовать источник радиоактивных веществ при тяжелой запроектной аварии, отвечающий рассмотренным источникам МАГАТЭ [12]. В таблице № 2 приведены максимальные расстояния, на которых анализируемые модели дают превышение дозовых пределов. На рис. 3 видно, что зоны превышения имеют пятнистый характер. Это связано

с географическими особенностями региона, неоднородной подстилающей поверхностью и повторяемостью атмосферных течений при рассмотрении многолетней истории наблюдений. Выход за границы применимости гауссовых моделей (10–20 км от источника) требует применения моделей атмосферного переноса, которые более детально учитывают процессы рассеяния и осаждения, что приводит к нелинейной зависимости величины осаждения от интеграла концентрации и в итоге к наличию

пятнистой картины. В таблице № 2 также представлена дифференциация по целевым функциям, которые учитывались при построении соответствующих зон планирования. Результаты расчетов показывают, что доза на плод в большинстве случаев является критическим параметром, определяющим размер соответствующей зоны. В случае модели РБ-094-14 [13] определяющим фактором является сочетание жесткого дозового предела и дополнительного консерватизма, заложенного в модель.

Таблица № 1

Расчетные размеры зон планирования защитных мероприятий для аварии с вероятностью 10^{-7} на реакторной установке с ВВЭР
Calculated protective action planning distances for an accident with a probability of 10^{-7} at a VVER-type reactor

РБ-094-14		МТ 1.2.5.05.0110-2012		МАГАТЭ	
Название зоны	Размер	Название зоны	Размер	Название зоны	Размер
Зона № 1	0 км	ЗПМОЭ	0 км по всем функциям	ЗПМ	0 км по всем функциям
Зона № 2		ЗПЗМ		ЗПСМ	
Зона № 3		-	-	РРП	0 км (эффективная доза), 8,3 км (плод)
Зона № 4		-	-	РППТ	

Таблица № 2

Расчетные размеры зон планирования защитных мероприятий для тяжелой запроектной аварии на реакторной установке с ВВЭР
Calculated protective action planning distances for a severe beyond design basis accident at a VVER-type reactor

РБ-094-14		МТ 1.2.5.05.0110-2012		МАГАТЭ	
Название зоны	Размер	Название зоны	Размер	Название зоны	Размер
Зона № 1	39 км (все тело), 8,3 км (легкие), 42 км (кожа) , 22 км (ЩЖ), 8,3 км (гонады), 260 км (плод)	ЗПМОЭ	3,3 км (все тело), 0 км (ЩЖ), 0 км (легкие), 11,3 км (кожа)	ЗПМ	0 км (ККМ), 0–6 км (плод)
Зона № 2	91 км	ЗПЗМ	206 км (все тело) , 55 км (ЩЖ), 147 км (легкие), 161 км (кожа)	ЗПСМ	6–11 км (эффективная доза), 11–22 км (плод)
Зона № 3	316 км	-	-	РРП	95 км (эффективная доза), 142 км (плод)
Зона № 4	320 км	-	-	РППТ	98 км (эффективная доза), 582 км (плод)

Примечания:

ЩЖ – щитовидная железа;

ККМ – красный костный мозг.

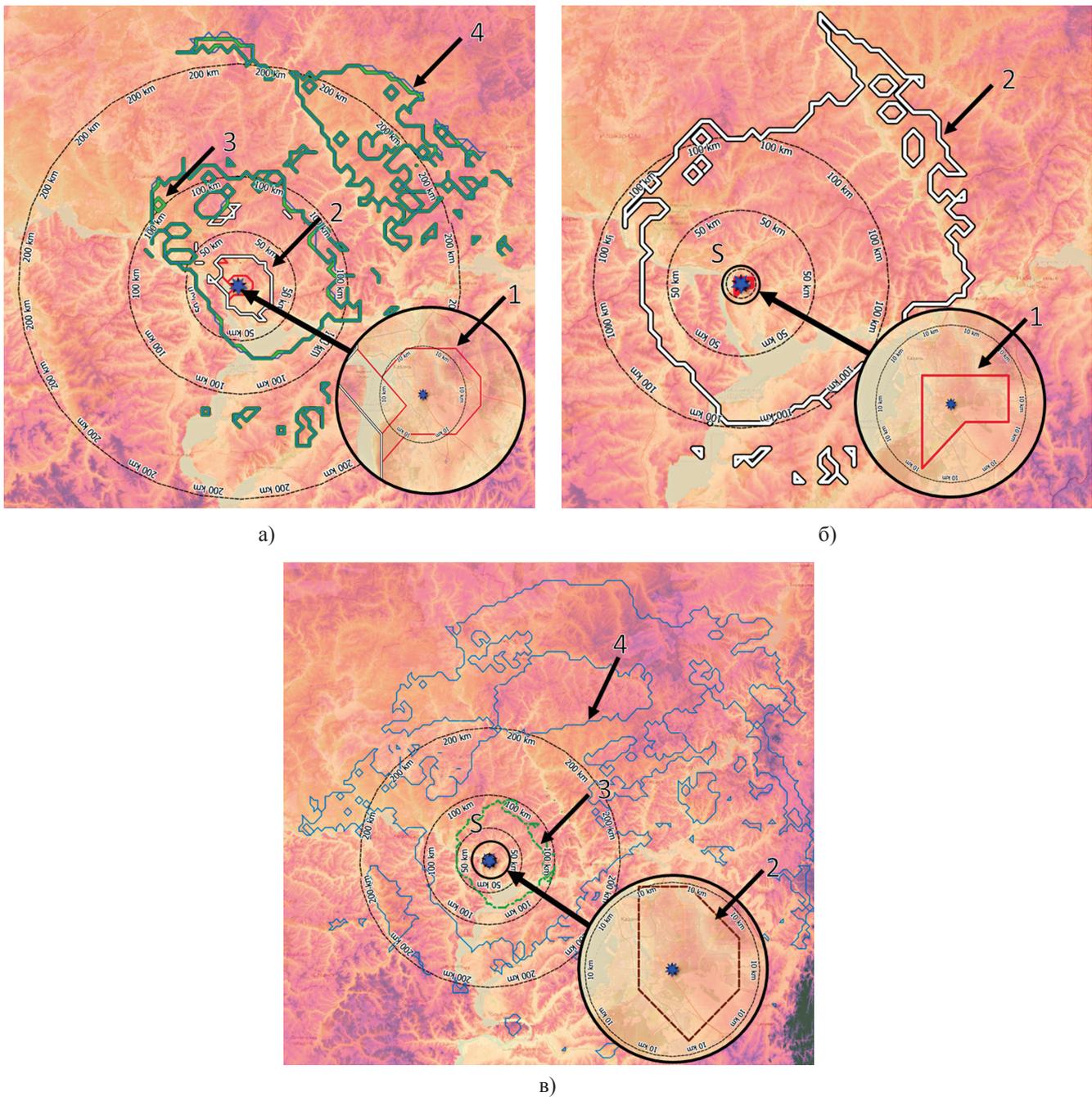


Рис. 3. Расчетные зоны планирования в соответствии с РБ-094-14 (а), МТ 1.2.5.05.0110-2012 (б) и МАГАТЭ (в) для тяжелой запроектной аварии на реакторной установке с ВВЭР; цифрами изображены номера зон в порядке ослабления прогнозируемых последствий [Fig. 3. Calculated planning zones in accordance with RB-094-14 (a), МТ 1.2.5.05.0110-2012 (b) and the IAEA (c) for a severe beyond design basis accident at a VVER-type reactor; the digits represent the zone numbers in order of reducing the predicted consequences]

Следует выделить несколько особенностей методик расчета размеров зон планирования:

- В данной работе использованы выбросы небольшой продолжительности, однако в вероятностном анализе безопасности (например, в [14] «Длительность выполнения расчетов тяжелых аварий рекомендуется принимать с учетом длительности аварийных выбросов, которую рекомендуется принимать равной не менее 24 часам после начала аварийных выбросов») рассматриваются и много-

суточные аварии, при этом Всемирная организация здравоохранения [28] ограничивает йодную профилактику для беременных женщин однократным приемом таблеток стабильного йода. Это приведет к значительно большим прогнозируемым дозам на щитовидную железу и плод для таких сценариев аварий;

- В отношении размеров зон результаты, полученные по методикам МТ 1.2.5.05.0110-2012 [22] и МАГАТЭ [12], оказываются сопоставимы, если принять во внимание рекомендации МАГАТЭ, что

ЗПМ и ЗПСМ должны быть эвакуированы, а их различие обусловлено главным образом разным уровнем приоритета проведения срочных мер защиты;

- Согласно РБ-094-14 [13] и документам МАГАТЭ [12] оценка размеров зон планирования предполагает, что меры защиты будут проведены незамедлительно, и только в этом случае расчетные значения доз облучения населения с определенной степенью достоверности не превысят общие критерии. Это означает, что в этих зонах (и даже на больших расстояниях) должен быть обеспечен достаточный запас йодных препаратов, обеспечены возможности для укрытия, информирования и эвакуации;

- Во всех сценариях рассматривались либо средние значения прогнозируемых доз облучения, либо с уровнем обеспеченности 95 %. Это означает, что в случае аварии и неблагоприятных метеорологических условий не исключается превышение пределов доз на больших расстояниях, чем зоны планирования. Таким образом, для обеспечения радиационной безопасности населения необходимы остальные элементы аварийного реагирования (прогноз по фактически реализуемым метеоусловиям, мониторинг и другие);

- Необходимо также отметить важность мониторинга окружающей среды. Результаты измерений параметров радиационной обстановки, сравнение их с действующими уровнями вмешательства остаются основой для принятия решений о проведении мер защиты или о прекращении данных мероприятий после того, как сформировалось радиоактивное загрязнение.

Заключение

Для аварии на реакторной установке с ВВЭР с вероятностью возникновения на уровне 10^{-7} все рассмотренные подходы показывают, что превышение доз облучения на границе зон планирования защитных мероприятий не будет достигнуто, причем дозовые пределы не будут превышены на всем рассмотренном диапазоне расстояний за исключением зоны РППТ МАГАТЭ [12], где ограничение потребления продуктов питания должно быть введено на расстояниях до 8,3 км, поскольку прогнозируется превышение дозы на плод. Таким образом, подход МТ 1.2.5.05.0110-2012 [22], основанный на сочетании ограничения вероятности возникновения аварии и методов расчетов последствий, приводит к выполнению требований EUR [11] о безопасности проекта (пероральное поступление

не учитывается в оценках размеров зон планирования). Однако сам подход не удовлетворяет рекомендациям МАГАТЭ [12], поскольку зоны планирования должны устанавливаться на основе оценки опасности.

Если отказаться от вероятностного критерия и перейти в парадигму анализа опасности (РБ-094-14 [13], МАГАТЭ [12]), рассмотрев тяжелую запроектную аварию, по уровню выброса сопоставимую с выбросами при авариях на АЭС «Фукусима-1» и Чернобыльской АЭС, результаты становятся заметно отличными: зоны планирования по РБ-094-14 показывают необходимость мероприятий на десятки километров от условной аварии (следует отметить, что в НРБ 99/2009 [29] установлены жесткие ограничения на дозу для плода, которая вместе с консерватизмом по учитываемым путям облучения приводит к расстояниям 200 км и более). Подходы МТ 1.2.5.05.0110-2012 [22] и МАГАТЭ [12] показывают сопоставимые результаты, которые приемлемо соотносятся с предлагаемыми размерами зон МАГАТЭ, хотя и несколько превышают их в основном за счет дозы на плод. Превышения дозовых пределов получены по дозе на плод, дозе на кожу и дозе на все тело, которые в ряде случаев оказались доминирующими.

Подчеркнем, что полученные в настоящей работе результаты, и в частности размеры зон планирования, не являются полностью консервативными, они получены в рамках определенного круга приближений. При некоторых условиях могут быть получены большие значения доз облучения за пределами зон планирования защитных мероприятий. Учесть эту особенность в стратегии защиты населения возможно за счет проведения мониторинга и применения соответствующих уровней вмешательства, прогноза параметров радиационной обстановки и доз облучения населения.

Следует также отметить, что, в соответствии с требованиями методик (кроме МТ 1.2.5.0110-2012 [22]), оценка размеров зон планирования проводилась с учетом мер защиты населения, поэтому полученные размеры зон применимы только при условии выполнения мер защиты (укрытие, йодная профилактика, эвакуация). Полученные результаты справедливы для выбранной области в силу учета конкретной топографии и метеоусловий для данной территории. Для другой площадки результаты будут другими, однако основные принципы проведения расчетов и характерные соотношения размеров зон планирования будут сопоставимыми.

Литература

1. Иванов Е. А., Косов А. Д., Илларионенкова Д. В. Проблемы аварийного зонирования территории вокруг АЭС // АНРИ. 2016. № 4 (87). С. 2–6. EDN WZIRRZ.
2. Курындин А. В., Сорокин Д. В., Шаповалов А. С., Шарафутдинов Р. Б., Иванов Е. А. О необходимости совершенствования подходов к установлению зон противоаварийного планирования объектов использования атомной энергии // Ядерная и радиационная безопасность. 2021. № 3 (101). С. 26–35. DOI: 10.26277/SECNRS.2021.101.3.003.
3. О радиационной безопасности населения: Федер. закон от 09.01.1996 № 3-ФЗ.
4. Нормы безопасности МАГАТЭ. Общие требования безопасности № GSR part 7. Готовность и реагирование в случае ядерной или радиологической аварийной ситуации. – Вена, МАГАТЭ, 2016.
5. СанПин 2.6.1.24-03. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АС-03): утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 22.04.2003.
6. Методические указания по расчету радиационной обстановки в окружающей среде и ожидаемого облучения населения при кратковременных выбросах радиоактивных веществ в атмосферу (МПА-98). – М.: Минатом России, 1998.
7. Харченко Е. В. Использование математических моделей переноса и рассеяния радионуклидов в атмосфере для управления рисками на стадии проектирования атомных электростанций: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 25.00.30 / Харченко Евгения Владиславовна; [Место защиты: Российский государственный гидрометеорологический университет]. – Санкт Петербург, 2016. – 117 с.
8. RODOS-based Simulation of Potential Accident Scenarios for Emergency Response Management in the Vicinity of Nuclear Power Plants, 12.09.2016. URL: <https://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-2016091214084/3/BfS-SCHR-60-16.pdf> (дата обращения: 20.07.2023).
9. Отчет о верификации и обосновании программного средства «Программа для расчета радиационной обстановки в мезомасштабе. Версия 1.1 (РОМ)». – М.: ИБРАЭ РАН, 2017. – 231 с.
10. Iivonen M., Rossi J. (2017). VALMA extension with ingestion doses assessment. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Research Report. Vol. VTT-R-00695-17. URL: <https://publications.vtt.fi/julkaisut/luutu/2017/VTT-R-00695-17.pdf> (дата обращения: 20.07.2023).
11. European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants, Revision D, December 2012.
12. Actions to Protect the Public in an Emergency due to Severe Conditions at a Light Water Reactor, EPR-NPP Public Protective Actions-2013, IAEA, Vienna, 2013.
13. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Минимизация радиационных последствий для населения и персонала при ликвидации последствий аварий на энергоблоках атомных электростанций разных типов. Методика оптимизации мер по защите населения и территорий (РБ-094-14): утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 19.03.2014 № 107.
14. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендации по разработке вероятностного анализа безопасности уровня 2 для блока атомной станции (РБ-044-18): утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 09.08.2018 № 355.
15. Арон Д. В., Волков А. Д., Дьяков С. В., Зарянов А. В. Моделирование зон аварийного планирования защитных мероприятий при радиационной аварии на данных по территории префектуры Фукусима // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2020. Т. 29. № 1. С. 140–153. DOI 10.21870/0131-3878-2020-29-1-140-153. EDN FBFVAR.
16. Morozov V. B., Kiselev A. E., Kiselev A. A., Dolganov K. S., Tomashchik D. Yu. & Krasnoperov S. N. (2020). Issues of safety assessment of new Russian NPP projects in view of current requirements for the probability of a large release. Nuclear Technology, Vol. 207, iss. 2, pp. 204–216. DOI: 10.1080/00295450.2020.1767998.
17. Рубинштейн К. Г., Сафронов А. Н., Припачкин Д. А., Игнатов Р. Ю., Емелина С. В., Набокова Е. В., Курбатова М. М., Благодатских Д. В., Арутюнян Р. В., Сороковикова О. С., Семенов В. Н. Сравнение результатов моделей переноса ^{85}Kr в атмосфере с данными натурального эксперимента ACURATE // Метеорология и гидрология. 2017. № 3. С. 41–57.
18. Киселев А. А. Система кодов для проведения расчетов атмосферного переноса для задач обоснования безопасности ЯРОО в сложных орографических условиях // Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях / сб. материалов XI Российской научной конференции, Москва, 26–29 октября 2021 г. – М.: ИБРАЭ РАН, 2022. – С. 43–51. – EDN TLNBLF.

19. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности блока атомной станции с реактором типа ВВЭР (НП-006-16): утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору 13.02.2017 № 53.

20. Романович И. К., Балонов М. И., Барковский А. Н. и др. Комментарии к Нормам радиационной безопасности (НРБ-99/2009) / под ред. академика РАМН Г. Г. Онищенко. – Москва: Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П. В. Рамзаева, 2012. – 216 с. – EDN YKYHSP.

21. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности. Промежуточное издание. Общие требования безопасности. Серия норм МАГАТЭ по безопасности No. GSR Part 3 (Interim). – Вена: МАГАТЭ, 2011. – 311 с.

22. Методика определения размеров зон планирования защитных мероприятий в случае аварии на атомной станции (МТ 1.2.5.0110-2012): введена в действие ОАО «Концерн Росэнергоатом» приказом № 9/656-П от 16.07.2013.

23. Operational intervention levels for reactor emergencies and methodology for derivation. EPR-NPP-OILs, ISSN 2518–685X; No. 479, IAEA, Vienna, 2017.

24. Арутюнян Р. В. и др. Константное обеспечение для расчета доз облучения населения. Обзор // Радиация и риск. 2018. Т. 27. № 3. С. 91–103.

25. Арутюнян Р. В. и др. Об использовании дозовых коэффициентов в программных комплексах оценки и прогнозирования радиационной обстановки при аварийных ситуациях // Радиация и риск. 2019. Т. 28. № 1. С. 92–102.

26. Authority for Nuclear Safety and Radiation Protection 2020. ANVS Guide on Level 3 PSA. March 2020.

27. Bolshov L. A., Dolganov K. S., Kiselev A. E., Strizhov V. F. Results of SOCRAT code development, validation and applications for NPP T safety assessment under severe accidents. Nuclear Engineering and Design, Vol. 341, January 2019, pp. 326–345.

28. World Health Organization. Iodine thyroid blocking guidelines for use in planning and responding to radiological and nuclear emergencies. 2017. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241550185> (дата обращения: 20.07.2023).

29. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 100 с.

References

1. Ivanov E. A., Kosov A. D., Illarionenkova D. V. (2016). Problemy avariinogo zonirovaniya territorii vokrug AEHS [Problems of emergency zoning of the territory around nuclear power plants]. ANRI – ANRI, No. 4 (87), pp. 2–6. EDN WZIRRZ. [in Russian].

2. Kuryndin A. V., Sorokin D. V., Shapovalov A. S., Sharafutdinov R. B., Ivanov E. A. (2021). O neobkhodimosti sovershenstvovaniya podkhodov k ustanovleniyu zon protivovariinogo planirovaniya ob"ektov ispol'zovaniya atomnoi ehnergii [On the need to improve approaches to establishing emergency planning zones for nuclear facilities]. Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety Journal, No. 3 (101), pp. 26–35. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2021.101.3.003.

3. Federal'nyi zakon “O radiatsionnoi bezopasnosti naseleniya” No. 3-FZ [Federal Law “On radiation safety of the population” No. 3-FZ]. 1996.

4. IAEA Safety Standards. General Safety Requirements No. GSR part 7. Preparedness and response for a nuclear or radiological emergency. IAEA, Vienna, 2016.

5. SanPin 2.6.1.24-03. Sanitarnye pravila proektirovaniya i ehkspluatatsii atomnykh stantsii (SP AS-03) [SanPin 2.6.1.24-03 “Sanitary rules and norms for the design and operation of nuclear power plants (SP AS-03)”]. 2003.

6. Metodicheskie ukazaniya po raschetu radiatsionnoi obstanovki v okruzhayushchei srede i ozhidaemogo oblucheniya naseleniya pri kratkovremennykh vybrosakh radioaktivnykh veshchestv v atmosferu (MPA-98) [Guidelines for calculating the radiation situation in the environment and the expected exposure of the population during short-term releases of radioactive substances into the atmosphere (MPA-98)]. 1998.

7. Kharchenko E. V. (2016). Ispol'zovanie matematicheskikh modelei perenosa i rasseyaniya radionuklidov v atmosfere dlya upravleniya riskami na stadii proektirovaniya atomnykh ehlektrostantsii [The use of mathematical

models of the transfer and dispersion of radionuclides in the atmosphere for risk management at the design stage of nuclear power plants]. Candidate's thesis. Saint Petersburg. [in Russian].

8. RODOS-based Simulation of Potential Accident Scenarios for Emergency Response Management in the Vicinity of Nuclear Power Plants, 12.09.2016. URL: <https://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-2016091214084/3/BfS-SCHR-60-16.pdf> (reference date: 20.07.2023).

9. Otchet o verifikatsii i obosnovanii programmnoy sredstva "Programma dlya rascheta radiatsionnoy obstanovki v mezomasshtabe. Versiya 1.1 (ROM)" [Report on the verification and justification of the software tool "Program for calculating the radiation situation at the mesoscale. Version 1.1 (ROM)"]. IBRAE RAN, Moscow, 2017, 231 pp. [in Russian].

10. Ilvonen, M. & Rossi J. (2017). VALMA extension with ingestion doses assessment. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Research Report Vol. VTT-R-00695-17. URL: <https://publications.vtt.fi/julkaisut/muut/2017/VTT-R-00695-17.pdf> (reference date: 20.07.2023).

11. European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants, Revision D, December 2012.

12. Actions to Protect the Public in an Emergency due to Severe Conditions at a Light Water Reactor, EPR-NPP Public Protective Actions-2013, IAEA, Vienna, 2013.

13. Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoi ehnergii "Minimizatsiya radiatsionnykh posledstviy dlya naseleniya i personala pri likvidatsii posledstviy avarii na ehnergobloках atomnykh ehlektrostantsii raznykh tipov. Metodika optimizatsii mer po zashchite naseleniya i territorii" (RB-094-14) [Safety guide in the field of atomic energy use "Minimization of radiation consequences for the population and personnel in the elimination of the consequences of accidents at power units of nuclear power plants of different types. Methodology for optimizing measures to protect the population and territories" (RB-094-14)]. 2014.

14. Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoi ehnergii "Rekomendatsii po razrabotke veroyatnostnogo analiza bezopasnosti yrovnya 2 dlya bloka atomnoi stantsii" (RB-044-18) [Safety guide in the field of atomic energy use "Recommendations on the development of level 2 probabilistic safety assessment for NPP unit" (RB-044-18)]. 2018.

15. Aron D. V., Volkov A. D., Dyakov S. V., Zaryanov A. V. (2020). Modelirovanie zon avariinogo planirovaniya zashchitnykh meropriyatii pri radiatsionnoi avarii na dannykh po territorii prefektury Fukusima [Modeling of emergency protective action planning zones in case of a radiation accident on data from the territory of Fukushima Prefecture]. Radiatsiya i risk (Byulleten' Natsional'nogo radiatsionno-ehpidemiologicheskogo registra) – Radiation and Risk (Bulletin of the National radiation epidemiological register), vol. 29, No. 1, pp. 140–153. [in Russian]. DOI 10.21870/0131-3878-2020-29-1-140-153. EDN FBFVAR.

16. Morozov V. B., Kiselev A. E., Kiselev A. A., Dolganov K. S., Tomashchik D. Yu. & Krasnoperov S. N. (2020). Issues of safety assessment of new Russian NPP projects in view of current requirements for the probability of a large release. Nuclear Technology, Vol. 207, iss. 2, pp. 204–216. DOI: 10.1080/00295450.2020.1767998.

17. Rubinshtein K. G., Safronov A. N., Pripachkin D. A., Ignatov R. Yu. Arutyunyan R. V., Sorokovikova O. S., Semenov V. N. (2017). Sravnenie rezul'tatov modelei perenosa ^{85}Kr v atmosfere s dannyimi natur'nogo ehksperimenta ACURATE [Comparison of the simulation results of the ^{85}Kr transfer in the atmosphere with the data of the ACURATE field experiment]. Meteorologiya i gidrologiya – Meteorology and Hydrology, No. 3, pp. 41–57. [in Russian].

18. Kiselev A. A. (2022). Sistema kodov dlya provedeniya raschetov atmosfernogo perenosa dlya zadach obosnovaniya bezopasnosti YAROO v slozhnykh orograficheskikh usloviyakh. Radiatsionnaya zashchita i radiatsionnaya bezopasnost' v yadernykh tekhnologiyakh [Code system for atmospheric transfer calculations for the problems of justifying the safety of NRHF in close orographic conditions. Radiation protection and radiation safety in nuclear technologies]. Sbornik materialov XI Rossiiskoi nauchnoi konferentsii (Moskva, 26–29 oktyabrya 2021 g.) – Proceedings of the XI Russian Scientific Conference (Moscow, October 26–29, 2021), pp. 43–51. Moscow: Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, EDN TLNBLF. [in Russian].

19. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoi ehnergii "Trebovaniya k sodержaniyu otcheta po obosnovaniyu bezopasnosti bloka atomnoi stantsii s reaktorom tipa VVEHR" (NP-006-16) [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use "Content requirements for the report on the safety analysis of a nuclear power plant unit with VVER" (NP-006-16)]. 2017.

20. Romanovich I. K., Balonov M. I., Barkovsky A. N. et al. (2012). Kommentarii k Normam radiatsionnoi bezopasnosti (NRB-99/2009) [Comments on radiation safety standards (NRB-99/2009)]. G. G. Onishchenko (Ed.). Moscow: St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene named after Professor Ramzaeva P. V. EDN YKYHSP. [in Russian].

21. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. Interim edition. General safety requirements. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3 (Interim). Vienna: IAEA, 2011. 311 pp.

22. Metodika opredeleniya razmerov zon planirovaniya zashchitnykh meropriyatii v sluchae avarii na atomnoi stantsii (MT 1.2.5.0110-2012) [Methodology for determining the radii of protective action planning zones in the event of an accident at a nuclear power plant (MT 1.2.5.0110-2012)]. 2013.

23. Operational intervention levels for reactor emergencies and methodology for derivation. EPR-NPP-OILS, ISSN 2518–685X; No. 479, IAEA, Vienna, 2017.

24. Arutyunyan R. V. et al. (2018). Konstantnoe obespechenie dlya rascheta doz oblucheniya naseleniya. Obzor [Constant support for the calculation of the population exposure doses. Review]. Radiatsiya i risk – Radiation and risk, V. 27, No. 3, pp. 91–103. [in Russian].

25. Arutyunyan R. V. et al. (2019). Ob ispol'zovanii dozovykh koehffitsientov v programmnykh kompleksakh otsenki i prognozirovaniya radiatsionnoi obstanovki pri avariinykh situatsiyakh [On the use of dose coefficients in software systems for assessing and predicting the radiation situation in emergencies]. Radiatsiya i risk – Radiation and risk, V. 28, No. 1, pp. 92–102. [in Russian].

26. Authority for Nuclear Safety and Radiation Protection 2020. ANVS Guide on Level 3 PSA. March 2020.

27. Bolshov L. A., Dolganov K. S., Kiselev A. E., Strizhov V. F. (2019). Results of SOCRAT code development, validation and applications for NPP T safety assessment under severe accidents. Nuclear Engineering and Design, Vol. 341, pp. 326–345. [in Russian].

28. World Health Organization. Iodine thyroid blocking guidelines for use in planning and responding to radiological and nuclear emergencies. 2017. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241550185> (reference date: 20.07.2023).

29. Normy radiatsionnoi bezopasnosti (NRB-99/2009). Sanitarno-ehpidemiologicheskie pravila i normativy SanPin 2.6.1.2523-09 [Radiation safety standards (NRB-99/2009). Sanitary rules and regulations SanPin 2.6.1.2523-09]. 2009.

Сведения об авторе

Киселев Алексей Аркадьевич, и. о. заведующего отделом прикладного математического моделирования и применения специальных программно-технических средств, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН) (115191, Москва, ул. Большая Тульская, д. 52). ORCID – 0000-0001-6543-2160, WOS Research ID – GLT-8990-2022, Scopus Author ID – 57820640900.

Author credentials

Kiselev Alexey Arkad'evich, Acting Head of Division of Applied Mathematical Application and Special Software and Hardware, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (IBRAE RAN) (52, Bolshaya Tulsкая Str., Moscow, 115191, Russia), e-mail: aak@ibrae.ac.ru.

Для цитирования

Киселев А. А. Сравнительный анализ размеров зон планирования защитных мероприятий для двух гипотетических радиационных аварий // Ядерная и радиационная безопасность. 2023. № 3 (109). С. 36–49. DOI: 10.26277/SECNRS.2023.109.3.003.

For citation

Kiselev A. A. Comparative analysis of protective action planning zones for two hypothetical radiation accidents. Nuclear and Radiation Safety Journal, 2023, No. 3 (109), pp. 36–49. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2023.109.3.003.