



УДК: 621.039

DOI: 10.26277/SECNRS.2025.116.2.003

© 2025. Все права защищены.

## МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВРЕМЕН ДОСТИЖЕНИЯ ДОЗОВЫХ КРИТЕРИЕВ ОБЛУЧЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ ПО МЕЖДУНАРОДНЫМ СТАНДАРТАМ В ЗАДАЧАХ ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС

Киселев А. А.\* (aak@ibrae.ac.ru),  
Коняев П. А.\* (konyaev@ibrae.ac.ru),  
Зайцева А. А.\* (zaitseva@ibrae.ac.ru)

Статья поступила в редакцию 23 апреля 2025 г.

### Аннотация

*В статье представлены результаты сравнительного анализа времен достижения дозовых критериев облучения населения для постулируемого в вероятностном анализе безопасности сценария тяжелой аварии.*

*Моделирование выполнялось с использованием модели атмосферного переноса, реализованной в коде «РОМ 2.1», по международным рекомендациям проведения расчетов для такого класса аварий с использованием критериев для доз облучения населения, установленных Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) в Международных основных нормах безопасности (GSR-3): эквивалентной дозы на плод, эффективной дозы, а также дозы, взвешенной по относительной биологической эффективности для тканевых реакций на красный костный мозг и на плод.*

*Предложены два метода оценки времен достижения дозовых критериев, основанных на разных подходах к статистической обработке результатов расчета доз облучения населения. На примере гипотетической тяжелой аварии с плавлением топлива на реакторной установке с ВВЭР-1000 получено, что определение времени достижения дозовых критериев за пределами зоны планирования защитных мероприятий на основе пространственных огибающих прогнозируемых доз менее консервативно, чем определение времени достижения дозовых критериев, которое не будет превышено на границе окружности заданного радиуса и за ее пределами. Поведение функций распределения отражает динамику выброса и характерные времена, когда происходят существенные с точки зрения радиационной безопасности населения изменения активности выброса. Показано, что оба метода за счет формы распределения позволяют получить сопоставимую пространственно-временную информацию о запасе времени на проведение мер защиты населения в случае тяжелой аварии с плавлением топлива.*

► **Ключевые слова:** атмосферный перенос, взвешенная по относительной биологической эффективности доза, тяжелые аварии, зоны планирования защитных мероприятий, вероятностный анализ безопасности, время достижения дозовых критериев.

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

## MODEL TO ASSESS THE TIMES OF EXCEEDING DOSE CRITERIA FOR THE POPULATION IN ACCORDANCE WITH INTERNATIONAL SAFETY ANALYSIS RECOMMENDATIONS

Kiselev A. A.\*; Ph. D.,  
Konyaev P. A.\*,  
Zaitseva A. A.\*

The article was received by the editors' crew on April 23<sup>th</sup>, 2025.

### *Abstract*

*The article outlines the results of the comparison analysis regarding the time frame required to reach dose thresholds for the severe accident scenario postulated in the probabilistic safety analysis.*

*The modeling was conducted using the atmospheric transport model integrated within the ROM 2.1 code, adhering to international guidelines for calculations associated with this category of incidents, using public exposure dose criteria set out by the International Atomic Energy Agency (IAEA) in the International Basic Safety Standards (GSR-3): equivalent dose to the fetus, effective dose, and relative biological effectiveness weighted dose in the red bone marrow and the fetus applicable to tissue reactions.*

*Two methods are proposed for assessing the timing of achieving dose criteria, based on different methods for the statistical processing of public exposure dose calculation results. In the context of a hypothetical severe accident involving fuel melting at a WWER-1000 reactor installation, it has been found that assessing the time to reach dose criteria outside the protective measures planning zone, based on spatial envelopes of predicted doses, is less conservative than evaluating the time to reach dose criteria that will not be surpassed at the boundary of a specified radius and beyond. The distribution functions' behavior indicates the release dynamics and the characteristic times at which notable changes in release activity from the point of view of radiation safety of the population take place. Both methods have been shown to demonstrate that the distribution forms facilitate the acquisition of comparable spatiotemporal information regarding the time buffer for implementing population protection measures in the event of a severe accident involving fuel melting.*

► **Keywords:** *atmospheric transport, relative biological effectiveness weighted dose, severe accidents, protective action planning zones, probabilistic safety analysis, time to reach dose thresholds.*

---

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

## Введение

При проведении анализа безопасности проектируемых и строящихся АЭС выполняется, в том числе, моделирование возможных радиологических последствий для населения для случаев возникновения аварийных ситуаций с поступлением радиоактивных веществ в окружающую среду. Вероятности таких аварий очень низки, однако, не могут быть исключены полностью. Чернобыльская авария и авария на АЭС «Фукусима-1» являются яркими примерами необходимости полного построения глубокоэшелонированной защиты и, в частности, системы аварийной готовности и реагирования. С учетом этого, в соответствии с НП-001-15 [1], в «ООБ АС должны быть представлены детерминистические и вероятностные анализы безопасности».

При рассмотрении круга сценариев аварийных выбросов на уровне вероятности  $10^{-7}$  и выше (один из критериев по определению большого аварийного выброса) зоны планирования защитных мероприятий (ЗПЗМ) не должны превышать 25 км по максимальному удалению от АЭС (НП-032-19 [2]), для новых АЭС часто как требование к проекту применяются ограничения по максимальной удаленности из EUR [3]. Такие сценарии не приводят к серьезным радиологическим последствиям для населения за пределами зон планирования защиты населения, ограниченных в основном территориями площадки и СЗЗ. Дополнительно при разработке организационных мер по управлению авариями, в соответствии с НП-001-15 [1] и с учетом комментариев [4], должны быть определены стратегии управления безотносительно к вероятности их возникновения. Оценки безотносительно к ограничению по уровню вероятности [1, 5] приводят также к необходимости проведения углубленного неконсервативного анализа аварий и их последствий, учитывая меры защиты населения, стратегию защиты и вероятности реализации метеорологических условий. Рассматриваемые масштабы при анализе возможных последствий аварийных выбросов при этом стали значительно больше. Это привело к необходимости развития расчетно-прогностических инструментов для задач обоснования безопасности. В Российской Федерации актуальность проблемы, в том числе, заключается (помимо разработки руководств по управлению тяжелыми авариями) в развивающемся строительстве АЭС за рубежом, где национальные планы действий при радиационных чрезвычайных ситуациях построены на нормах Международного агентства по атомной

энергии (МАГАТЭ), а анализ последствий аварий требует гармонизации с соответствующими критериями для доз облучения населения, установленными на национальном уровне этих государств. К таким странам относится, например, Турецкая Республика.

Инструментами для проведения анализа последствий аварийных выбросов за рубежом являются новые версии кодов «JRODOS» [6], «ARGOS» [7], «VALMA/SILAM» [8], «MACCS/HYSPLIT» [9], основанные на принципах вариантного анализа метеоусловий с построением огибающих по возможным последствиям [10]. В России ближайшими аналогами являются коды «РОМ» [11], «ДОЗА\_М» [12] и «RISKZONE» [13]. За последние годы код «РОМ» (разработан на базе кода «НОСТРАДАМУС») получил существенное развитие [14, 15] как в модельном наполнении, так и в функциональных возможностях: добавлен связанный расчет с численными моделями динамики атмосферы, развиты алгоритмы работы с ретроспективными метеорологическими рядами, развита модель атмосферного переноса, гармонизированы модели расчета доз облучения с международными основными нормами безопасности. Это связано с несколькими факторами:

1. Для анализа длительных аварий с неравномерным выбросом необходимо учитывать изменение метеоусловий за время действия источника;
2. Уход от вероятности аварии приводит к увеличению характерных моделируемых расстояний до 100 км и выше [5];
3. Требуется перебрать все характерные для площадки размещения метеоусловия с учетом окружающих ландшафтов местности [16];
4. Требуется провести анализ более чем 100 радионуклидов в составе выброса [17, 18] и выполнить расчет доз облучения населения с учетом установленных для целей зонирования типов доз [19].

Последние два пункта связаны с разделением зон по назначению – недопущения детерминированных эффектов и снижения риска стохастических эффектов, что определяет приоритизацию проведения мер защиты. Заложенная в коде «РОМ» технология проведения вариантных расчетов с перебором метеоусловий позволяет оценивать прогнозируемые дозы от аварии в целом, что соответствует НРБ-99/2009 [20] с учетом разъяснений, обозначенных в комментариях [21], что длительность 10 суток в таблице 6.3 взята как предполагаемый максимальный период времени после возникновения аварии, когда уже не ожидается ухудшения радиационной обстановки. Кроме того, в МТ 1.2.5.05.0110-2012 [22]

все дозы рассматриваются через «*t* суток после аварии» (не после постулированного инициирующего события или отказа). В данной статье под постулированным инициирующим событием понимается событие, возникновение которого непосредственно приводит к неуспешному конечному состоянию или может привести к такому состоянию при невыполнении функций безопасности. Аналогичная ситуация в рекомендациях МАГАТЭ [5], которые лежат в основе ЗПЗМ. Однако для длительных выбросов с целью гармонизации результатов моделирования с планами по защите населения, где, в том числе, установлены регламенты на проведение мер защиты, полезным является анализ не только возможных радиологических последствий, но и динамики формирования дозы с учетом сил и средств, заложенных на аварийное реагирование. Такой подход позволит более детально проработать вопросы, рассматриваемые в задачах обоснования безопасности (GSR-3 МАГАТЭ [23]), аварийной готовности и реагирования (GSR-7 МАГАТЭ [19]), например с учетом времени, необходимого на проведение эвакуации из зоны предупредительных мер (ЗПМ) и зоны планирования срочных защитных мер (ЗПСМ) [5, 22]. Необходимость проведения такого анализа возникает также и в современных требованиях к результатам моделирования последствий тяжелых аварий с плавлением топлива в рамках детерминистической поддержки вероятностного анализа безопасности.

С учетом изложенного в рамках настоящей статьи рассмотрим модель определения времени достижения дозовых критериев на границе ЗПЗМ и за ее пределами с учетом динамики развития аварии, реализованную в коде «РОМ 2.1» и возникшую как логическое продолжение развития возможностей анализа длительных аварийных выбросов, для которых планирование мер защиты населения (например, эвакуация) может выполняться поэтапно. Целью статьи является сравнение результатов моделирования облучения населения в рамках стандартов МАГАТЭ для гипотетической аварии с использованием двух методов:

1. определение времени достижения дозовых критериев за пределами зон планирования защитных мероприятий из [5, 22] на основе пространственных огибающих прогнозируемых доз, полученных путем статистического анализа серий прогнозов распространения отдельно для каждой точки расчетной области;
2. определение времени достижения дозовых критериев, которое с заданным уровнем обеспеченности (за счет метеословий) не будет превышено

на границе окружности заданного радиуса и за ее пределами.

Фактически эти методы отличаются принципом проведения статистической обработки результатов. В первом методе строятся пространственные огибающие [10] по возможным последствиям, на основе которых выполняется построение на карте возможных последствий. Этот метод максимально близок к предложенному в МПА-98 [10] подходу к построению огибающих [10, 24]. Во втором методе анализируется статистика конкретного показателя (в данном случае – времени достижения критерия по дозе), что аналогично подходу, использованному в работе [6] BfS (Германия) для определения размеров зон планирования. Следует отметить, что в части оценки времени достижения дозовых критериев оба метода построены как развитие, предложенное в работах [25, 26], по анализу результатов ансамблевого прогнозирования метода оценки вероятности достижения заданного значения.

### Описание используемых моделей

Модель расчета атмосферного переноса и доз облучения в коде «РОМ» представляет собой численное решение нестационарного уравнения адвекции – диффузии в стратифицированной атмосфере с использованием статистической теории атмосферной диффузии. В общем виде уравнение для концентрации может быть записано:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial UC}{\partial x} + \frac{\partial VC}{\partial y} + \frac{\partial WC}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + Q + S, \quad (1)$$

где  $C$  – концентрация примеси в контрольном объеме, Бк/м<sup>3</sup>;

$U = U(x,y,z,t)$ ,  $V = V(x,y,z,t)$  – горизонтальные компоненты скорости ветра, м/с;

$W(x,y,z,t)$  – вертикальная компонента скорости ветра, м/с;

$K_x(x,y,z,t)$ ,  $K_y(x,y,z,t)$ ,  $K_z(x,y,z,t)$  – коэффициенты диффузии, м<sup>2</sup>/с;

$Q(x,y,z,t)$  – активность, вышедшая в атмосферу, зависящая от времени и географического положения;

$S(x,y,z,t)$  – член уравнения, отвечающий за сухое осаждение примеси, вымывание осадками и радиоактивный распад.

Алеаторная неопределенность, связанная с метеорологическим фактором, учитывается путем проведения серий расчетов на основе исторических метеорологических данных. В коде «РОМ» первой

версии использовались данные с локальной метеомачты. Позднее модель была развита для использования метеорологических полей. Сейчас применяется связанный расчет с региональной численной моделью динамики атмосферы (учитывает географические особенности, данные метеорологического мониторинга и данные ретроспективного анализа глобальных атмосферных течений), что позволяет снять ограничения на моделируемые расстояния и однородность подстилающей поверхности. Перебор реализаций возможных доз облучения, в зависимости от метеоусловий, выполняется путем выделения подпоследовательности метеорологических фаз для различных времен гипотетического начала выброса по трехлетней истории метеорологических наблюдений [14]. Каждая подпоследовательность характеризуется временем начала и длительностью, достаточной для выхода всех облаков выброса за пределы расчетной области. Для обеспечения приемлемой скорости вычислений уравнение (1) решается в области расчета для часовых нормированных источников выброса  $Q(x,y,z,t)$  со смещением по времени начала действия источника по непрерывному метеорологическому ряду с вычислением плотности поверхностных выпадений и проинтегрированной по времени концентрации во всей расчетной области. В процессе моделирования каждого «кусочка» выброса учитывается, что метеорологические условия меняются в соответствии с метеорологическим рядом (отличает модель от квазистационарного подхода, применяемого в гауссовых моделях). После чего выполняется пересчет на дозы облучения путем свертки полученных величин от нормированного источника выброса с фактическим источником выброса. Результатом расчетов является 13 140 реализаций пространственного распределения значений доз за трехлетний период, что позволяет учесть суточный и сезонный ход метеорологических условий (суточный ход особенно важен при рассмотрении последствий в регионах с выраженной бризовой циркуляцией). Ближайший аналог данной модели реализован в коде «JRODOS», однако выборка там строится другим способом.

Граничные условия  $S(x,y,z,t)$  определяются свойствами атмосферы, окружающей среды и расчетной областью. В настоящем расчете параметры выбраны на основе рекомендованных в методических документах значений скоростей сухого осаждения и вымывания примеси различного типа осадками [11]. На текущий момент также реализованы реалистичные модели, описывающие взаимо-

действие компонентов выброса и объектов окружающей среды.

Модель оценки доз включает в себя следующие пути облучения [9, 18, 22]:

1. ингаляционное облучение в результате вдыхания радионуклидов от проходящего облака;
2. внешнее облучение от проходящего облака;
3. осаждение радионуклидов на кожу при прохождении облака и облучение кожи;
4. осаждение радионуклидов на кожу при прохождении облака и поступление в организм перорально;
5. внешнее облучение от загрязненной подстилающей поверхности;
6. ингаляционное облучение от вторичного подъема с загрязненной подстилающей поверхности;
7. внешнее облучение от вторичного подъема с загрязненной подстилающей поверхности;
8. осаждение радионуклидов на кожу при контакте с осевшими на поверхность радионуклидами и облучение кожи;
9. осаждение радионуклидов на кожу при контакте с осевшими на поверхность радионуклидами и поступление в организм перорально.

Константная база для вычисления доз облучения опирается на принципы построения самосогласованных наборов дозовых коэффициентов. Модель построения константной базы представлена в работах [27, 28, 29]. Дозовые критерии облучения и характеристики зон, для которых рассматривается вероятность, приведены в таблице № 1. При проведении расчетов, с учетом мер защиты, учитывается снижение итоговых величин доз за счет реализации таких мер, как укрытие и йодная профилактика. Также принимаются меры по минимизации попадания радиоактивных веществ в организм по незнанию, поэтому из перечня путей облучения исключено непреднамеренное заглатывание [18]. Различия в границах зон (например, 3 и 5 км) в таблице № 1 определяются различиями в эффективности защитных мероприятий, которые в данной статье моделируются с использованием набора понижающих коэффициентов, выбранных в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ [5]. Значения ЗПМ 3 км определяется с использованием йодной профилактики и укрытием в большом здании, а 5 км определяется с использованием йодной профилактики и укрытием в доме. Аналогично определены зоны 15–30 км. Фактически данный промежуток отражает неопределенность, связанную с действием защитных мер.

Таблица № 1

**Критерии определения границ зон планирования защитных мероприятий  
на основе рекомендаций МАГАТЭ  
Criteria for determining the boundaries of the emergency planning zones sizes based  
on the IAEA recommendations**

Зона аварийного реагирования	Граница зоны	Целевая функция	Значение дозового критерия
Зона предупредительных мер	3–5 км	Взвешенная по относительной биологической эффективности для тканевых реакций поглощенная доза на красный костный мозг за 30 сут	1 Гр
		Взвешенная по относительной биологической эффективности для тканевых реакций поглощенная доза на плод за период внутриутробного развития	1 Гр
Зона планирования срочных защитных мер	15–30 км	Эффективная доза за 7 сут	0,1 Зв
		Эквивалентная доза на плод за 7 сут	0,1 Зв

Таблица № 2

**Понижающие коэффициенты для учета мер защиты  
Reduction factors for taking into account protective measures**

Защитное мероприятие	Понижающий коэффициент	Доза, к которой применяется понижающий коэффициент
Укрытие в доме	0,4	Доза от внешнего облучения от подстилающей поверхности
	0,6	Доза от внешнего облучения от облака выброса
	0,5	Ингаляционная доза
Укрытие в большом здании	0,02	Доза от внешнего облучения от подстилающей поверхности
	0,3	Доза от внешнего облучения от облака выброса
	0,2	Ингаляционная доза
Йодная профилактика	0,1	Доза на щитовидную железу или плод

Значения дозы  $H(lon, lat, t, n)$  для каждого расчета в данном статистическом анализе характеризуются широтой ( $lat$ ), долготой ( $lon$ ), временем относительно постулированного инициирующего события аварийного процесса, условным временем начала аварии, соответствующим элементу выборки из ретроспективного анализа многолетних метеорологических данных. Модели расчета времен достижения критериев по дозе облучения населения приведены в таблице № 3. Расчет заданного уровня обеспеченности ( $p$ ) выполняется путем статистической обработки совокупности результатов расчетов доз и соответствующих им времен достижения дозовых критериев. Важным фактором, влияющим на результат ключевым образом, является минимизация/максимизация функционала (дозы или времени в зависимости от метода) по пространству ( $min_{lon, lat}/max_{lon, lat}$ ). В первом методе минимизация/

максимизация выполняется после построения огибающей, то есть предполагается, что человек не может находиться во всех направлениях одновременно, и рассматриваются максимальные последствия для каждой точки области отдельно. На этой основе выполняется картирование возможных последствий. Данный метод максимально близок к предложенному в МПА-98 [10] подходу к построению огибающих. Таким образом, для первого метода строится выборка из распределения возможных времен достижения дозовых критериев, полученная как результат анализа огибающих, где времена получены для каждой точки расчетной области отдельно. Здесь результаты моделирования дозы рассматриваются как эмпирическая функция распределения [8]. Для вычисления времен достижения дозовых критериев выполняется поиск условного минимума функции распределения в про-

Таблица № 3

**Модели расчета времен достижения дозовых критериев с учетом заданного уровня обеспеченности**  
**Models for calculating the times at which threshold dose values are exceeded,**  
**considering a specified confidence level**

Метод	Модель
Метод 1	$T(p) = \min_{lon,lat} (F^{-1}(p, lon, lat)),$ где $X_n = \min_t (\theta(H(lon, lat, t, n) - H_{lim}) \cdot t)$
Метод 2	$T(p) = \min_t (F^{-1}(t, p)   X_n(t) > 0),$ где $X_n(t) = \max_{lon,lat} (H(lon, lat, t, n) - H_{lim})$

**Примечание:**

- $\theta$  – Функция Хевисайда;
- $t$  – время достижения дозового критерия;
- $F$  – функция распределения, сформированная на  $n = [1 \dots N]$  рассмотренных метеорологических сценариях  $X_n$  из многолетней истории метеонаблюдений;
- $F^{-1}$  – соответствующая обратная функция распределения.

странстве для различных времен относительно времени постулированного иницирующего события аварийного процесса.

Во втором методе представлен более консервативный подход, когда рассматриваются последствия в целом, то есть проводится анализ масштаба возможных последствий вне зависимости от направлений переноса облака выброса от источника, конкретных мест проживания человека и объектов окружающей среды (аналог подхода, использованного в работе [6] BfS (Германия) для определения размеров зон планирования). В этом методе для определения времени достижения дозовых критериев строится выборка из распределения возможных времен достижения, полученная как результат анализа каждого сценария атмосферного переноса отдельно. Определяется минимальное значение времени достижения за пределами соответствующей области. Соответственно, время достижения в данном случае – время, которое с заданным уровнем обеспеченности не будет превышено за пределами рассмотренных зон.

**Исходные данные для моделирования**

**Источник**

В настоящей статье для целей сравнительного анализа использовался расчетный выход радиоактивных веществ в атмосферу для гипотетической тяжелой аварии на ВВЭР-1000, рассчитанный по коду «СОКРАТ/ВЗ» [30]. Параметры источника выброса получены в рамках бенчмарка версии кода «РОМ 2.1», проводившегося в рамках проекта координированных исследований J15002 МАГАТЭ по эффективному использованию прогностических

инструментов для обеспечения готовности и реагирования на ядерные и радиологические аварийные ситуации. Высота выброса принималась равной 40 м. На рис. 1 приведена динамика выброса радионуклидов в атмосферу. Через 2,9 ч после времени начала постулированного иницирующего события аварийного процесса формируется утечка через защитную оболочку. Дополнительно с этим через 3,1 ч происходит выброс радиоактивных веществ из-за разрыва трубок парогенератора. К восьмому часу начинается плавление активной зоны. К шестнадцатому часу происходит разрушение оболочки.

На рис. 2 представлена динамика радиологического эквивалента [31] выброса радионуклидов в атмосферу. Радиологический эквивалент рассматриваемой аварии составляет  $2,0 \cdot 10^{18}$  Бк, что сопоставимо с выбросами при авариях на Чернобыльской АЭС ( $5,2 \cdot 10^{18}$  Бк) и АЭС «Фукусима-1» ( $7,7 \cdot 10^{17}$  Бк). Выбор такой аварии соответствует рекомендациям МАГАТЭ [32, 33] при оценке опасности ядерных установок, где требуется учитывать потенциальные последствия возможных аварийных условий, в том числе с учетом опыта эксплуатации, и события с очень низкой расчетной вероятностью возникновения. Опыт рассмотрения гипотетических аварий для целей зонирования, сопоставимых с авариями на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1», прослеживается в международной практике [6].

**Данные о площадке**

Для демонстрации методов исследования были подготовлены четырехмерные (трехмерные по пространству плюс время) поля с метеорологическими параметрами (поля ветра, коэффициенты диффузии, температура, давление, масштаб Монина – Обухова,

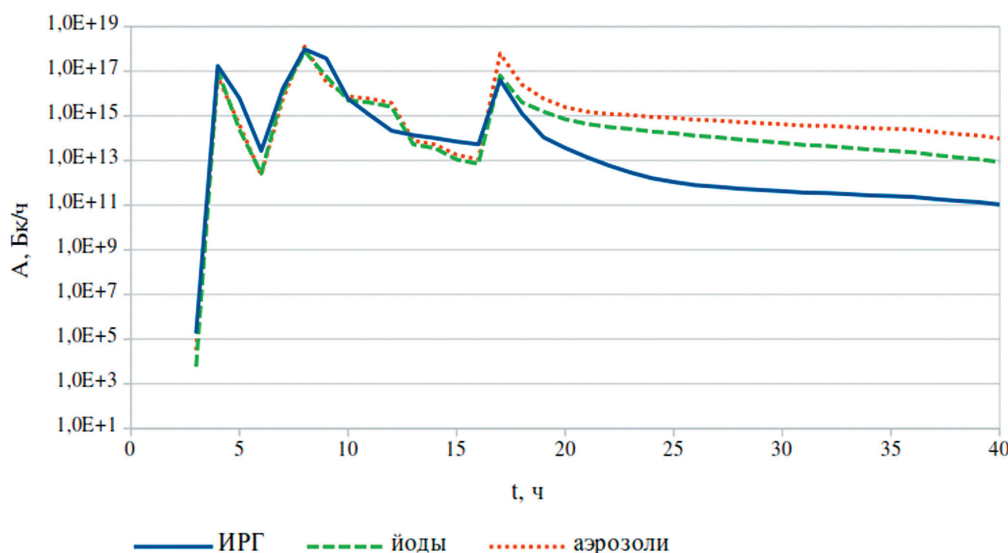


Рис. 1. Динамика выброса радионуклидов в атмосферу  
 [Fig. 1. Temporal dynamics of radionuclide emission into the atmosphere]

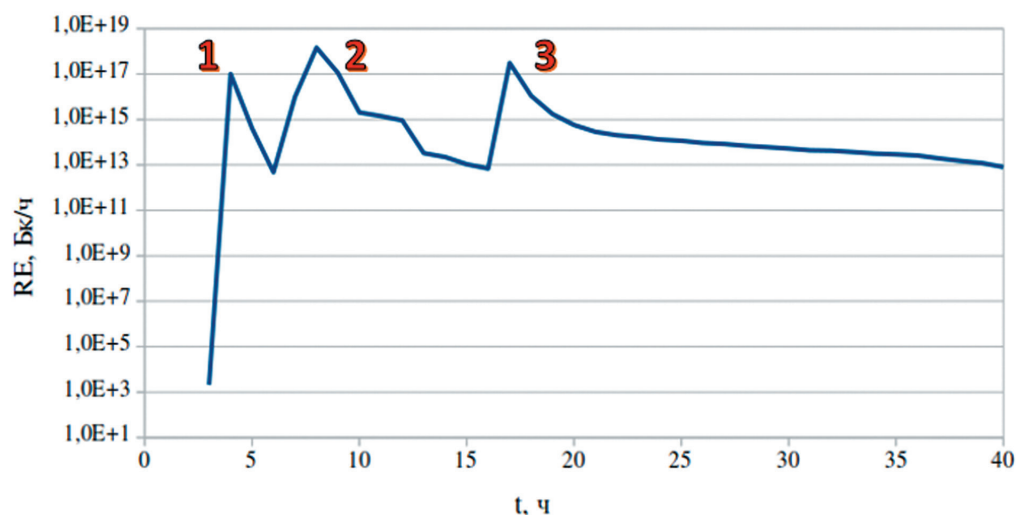


Рис. 2. Динамика радиологического эквивалента выброса радионуклидов в атмосферу  
 [Fig. 2. Temporal dynamics of the radiological equivalent of radionuclide atmospheric release]

скорость трения и осадки) за 2023 г. с разрешением 1 час и пространственным разрешением 667 м в 15-км области, 2 км в 100-км области от Ростовской АЭС.

На рис. 3 представлены розы ветров, полученные для трех метеорологических станций по данным измерений (OBS), а также данным, полученным на основе метеорологических полей по региональной модели численного прогноза динамики атмосферы (WRF). Видно, что как расчетные, так и измеренные величины имеют пространственную неоднородность. Статистические показатели соответствия расчетных значений измеренным приведены в таблице № 4 и соответствуют общепринятым типичным показателям [34].

На рис. 4 представлены картограммы распределения подстилающих поверхностей и высот в районе расположения АЭС [35, 36]. За исключе-

нием крупного водоема, территория относительно однородна. Рельеф местности имеет перепады до 100 м. На карте топографии водохранилище – светло-зеленое. Левее водохранилища можно видеть ложбину с меньшей высотой. Далее в настоящей статье рассматриваются дозы по селитебной территории, то есть территории, где проживает и ведет деятельность население. Для этого по маске вода – суша исключена вода при рассмотрении прогнозируемых доз. Следует отметить, что потребление продуктов питания местного производства при тяжелых авариях в ЗПЗМ считается ограниченным [5, 21]. Совокупность модельных допущений, ориентация на селитебность и реалистичная модель распространения позволяют рассматривать используемую в данной статье модель как реалистичную.

Таблица № 4

**Оценка метеорологических полей по отношению к наблюдениям и типичные величины**  
**Assessment of meteorological fields in relation to observations and typical values**

Параметр	Метрический показатель	Критерии	Значение ошибок
Скорость ветра	Среднеквадратичная ошибка (RMSE)	$\leq 2$ м/с	1,7
	ЮОА (индекс соответствия)	$\geq 0,6$	0,9
Направление ветра	Отклонение	$\leq \pm 10$ градусов	7,8
	Суммарная погрешность	$\leq 30$ градусов	13,5

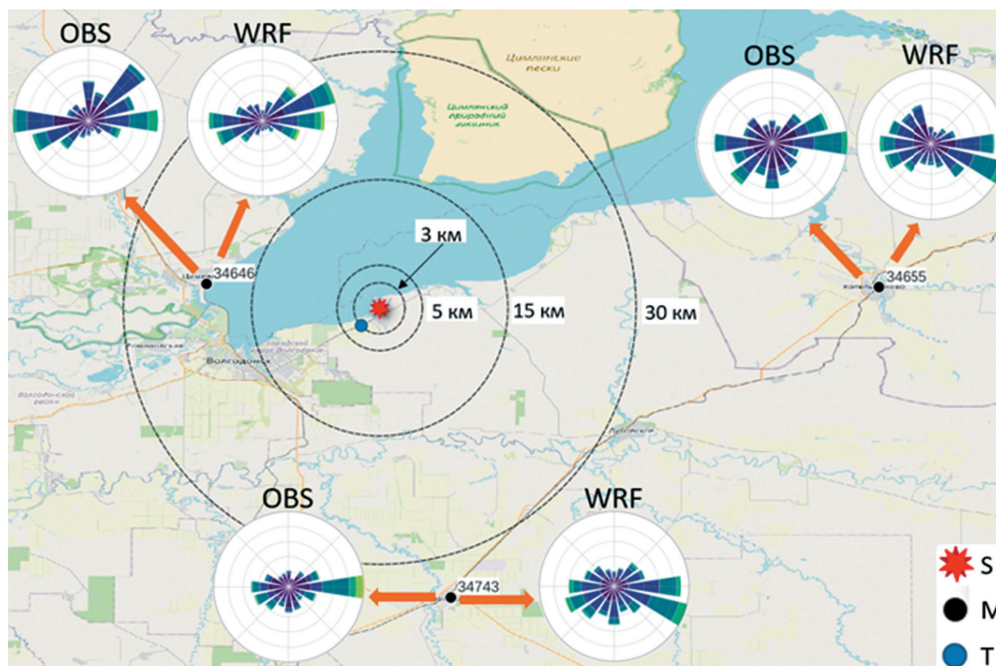


Рис. 3. Картограмма расположения станций метеорологического мониторинга, а также расчетные и измеренные розы ветров (*S* – АЭС, *M* – метеорологические станции, *T* – анализируемая точка)  
 [Fig. 3. Illustration of the geographical distribution of meteorological monitoring stations, alongside computed and observed wind roses (*S* – nuclear power plant, *M* – meteorological stations, *T* – analyzed point)]

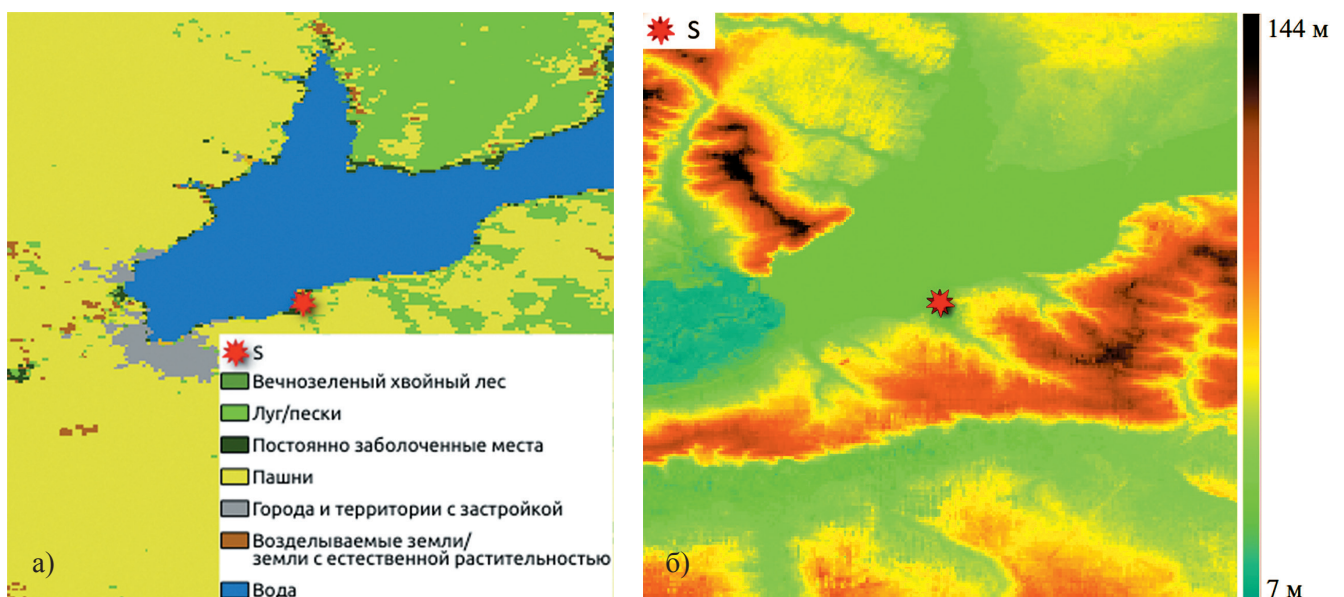


Рис. 4. Картограммы распределения типов подстилающих поверхностей [35] (а) и высот [36] (б) (*S* – АЭС)  
 [Fig. 4. Distribution mapping of underlying surface types [35] (a) and elevations [36] (b) (*S* – NPP)]

### Результаты и обсуждение

Для демонстрации результатов реализации моделей по методу 1, когда анализ выполняется отдельно для каждой области пространства с последующим построением огибающей, выбрана точка в расчетной области. Расположение точки представлено на картограмме на рис. 3 и обусловлено максимальными значениями доз за пределами границы ЗПМ (3 км) с учетом селитебной территории. Плотность вероятности, связанная с реализациями метеоусловий, для возможных доз облучения и времен достижения дозовых критериев из таблицы № 1 приведена на рис. 5. Видно, что плотность распределения для дозы носит монотонно убывающий характер. Это связано с тем, что большие значения доз в случае аварии определяются специфичной совокупностью метеорологических условий. В большинстве случаев дозы будут минимальны. Нулевые значения доз/отсутствие превышений дозовых критериев имеют преобладающий характер. В то же время плотности вероятности для времен превышения имеют ярко выраженные пики, соответствующие динамике выброса. Пики на графике выброса (рис. 1) соответствуют временам 4, 8 и 18 ч на рис. 5 (обозначены «1», «2» и «3», соответственно). Пик «4» на 25 ч обусловлен «хвостом» выброса и имеет меньшую, по сравнению с пиками «2» и «3», вероятность. Далее будет показано, что после минимизации по пространству он не будет

наблюдаться в итоговой функции распределения. Структура функций распределения дозы и времени достижения дозовых критериев различна. Для функции дозы – это в основном совокупность метеорологических условий, включая совместную реализацию последовательности метеорологических фаз и, в меньшей степени, временное распределение динамики выхода активности в атмосферу. Опыт анализа выбросов различной продолжительности (за рамками данной статьи) показывает, что динамика выброса влияет на распределение и при увеличении продолжительности приводит к уменьшению пиковых значений доз. Однако в этом случае растут вероятности в области средних значений доз за счет большего охвата территорий. Это связано с тем, что вероятность сохранения направления ветра существенно падает с увеличением временного интервала [37]. Для времени достижения дозовых критериев характеристики источника выброса проявляются в большей степени, поскольку учитываются дозовые критерии. На рис. 6 и 7 представлены расчетные картограммы максимально возможных доз и минимальные времена достижения дозовых пределов с исключенной неселитебной территорией для доз, соответствующих ЗПМ и ЗПСМ, соответственно. Видно, что итоговое распределение соответствует розе ветров, при этом имеют место участки неоднородности, определяющиеся местными атмосферными течениями.

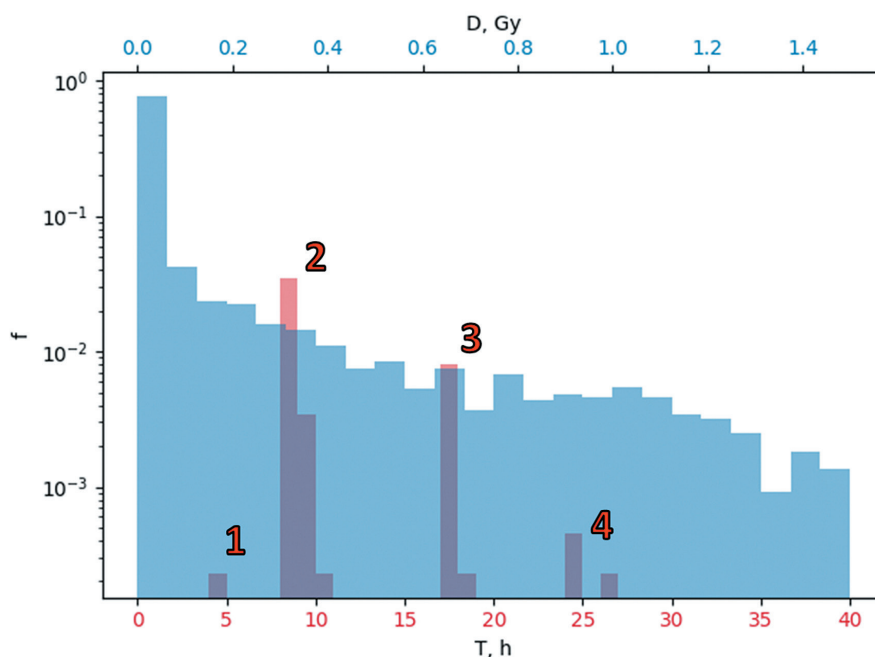


Рис. 5. Плотность распределений расчетных значений дозы ( $D$ ) и времен ( $T$ ) достижения дозового критерия на границе зоны предупредительных мер [Fig. 5. Probability density distribution of computed dose values ( $D$ ) and times ( $T$ ) of exceeding the threshold dose value at the boundary of precautionary action zone]

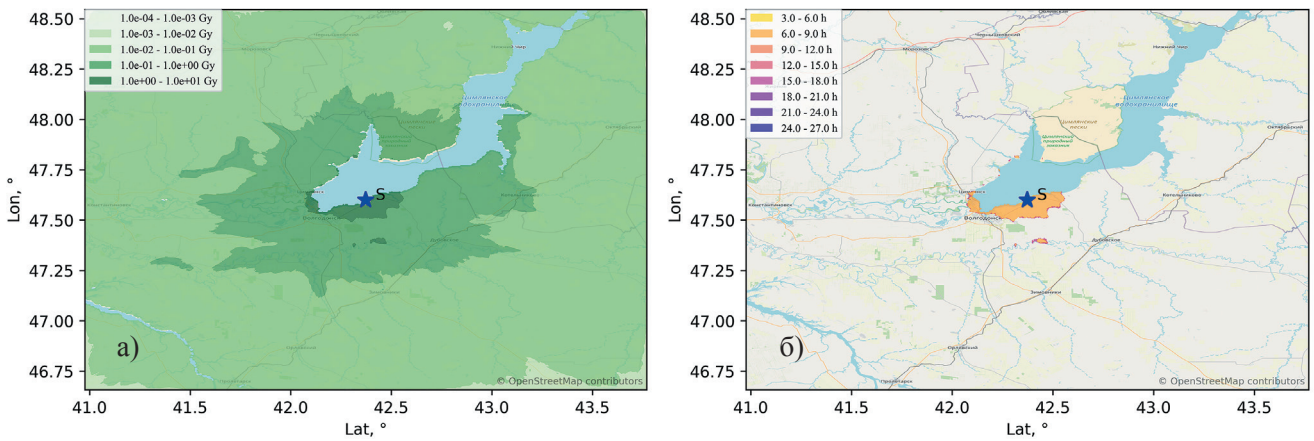


Рис. 6. Картограмма максимально возможных доз (а) и минимальные времена достижения дозовых критериев (б) для зоны предупредительных мер [Fig. 6. Illustration of the maximum potential doses (a) and the minimal frequency of exceeding dosage thresholds (b) for the precautionary action zone]

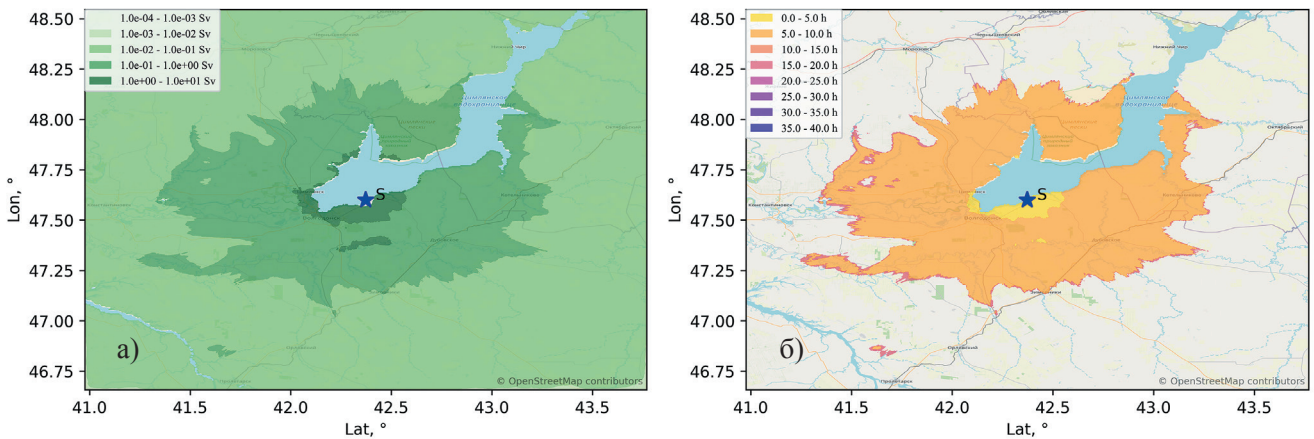


Рис. 7. Картограмма максимально возможных доз (а) и минимальные времена достижения дозовых критериев (б) для зоны планирования срочных защитных мер [Fig. 7. Illustration of the maximum potential doses (a) and the minimal frequency of exceeding dosage thresholds (b) for the urgent protective action planning zone]

Также прослеживается влияние топографии в виде неоднородных участков на северо-западе и юго-востоке от источника. Например, на рис. 7 (б) в нижнем левом квадранте виден статистически значимый узкий участок с превышениями дозовых критериев – это долина р. Сал. Поскольку в большинстве случаев ветер имеет тенденцию к ориентации по руслу рек, в статистически значимой части метеорологических условий облако выброса затягивается в область русла реки при ее пересечении на разных участках с последующим распространением вдоль русла. На рис. 6 (б) и 7 (б), по отношению к рис. 6 (а) и 7 (а), прослеживается зональная структура. Можно выделить зоны 0–5 и 5–15 ч, что соответствует характерным временам эвакуации, установленным МАГАТЭ для ЗПМ и ЗПСМ для сценариев тяжелых аварий. В рассматриваемом в данной статье подходе – это типичные для аварии и климата расположения АЭС времена достижения дозовых критериев.

Второй метод, как было отмечено, основан на пространственном анализе функции распределения доз за пределами заданных расстояний, то есть оценивается условная вероятность того, что за пределами ЗПЗМ по селитебной области могут быть превышены дозовые критерии. Данная величина уже не имеет пространственного распределения и описывает последствия в целом. На рис. 8 представлены функции распределения времен достижения дозовых критериев по методам 1 и 2 (М 1) и (М 2), соответственно, для ЗПМ и ЗПСМ. Метод 2 дает большие значения вероятностей, это связано с тем, что в данном методе рассматривается не конкретная область, а совокупная радиационная обстановка. Например, две реализации выброса, распространяясь в разные стороны и превышая значения доз за пределами зоны, дают в случае метода 1 вероятность превышения 50 % (то есть максимальная вероятность превышения в любой точке области за пределами ЗПЗМ будет не более 50 %), а в случае метода 2 – 100 %

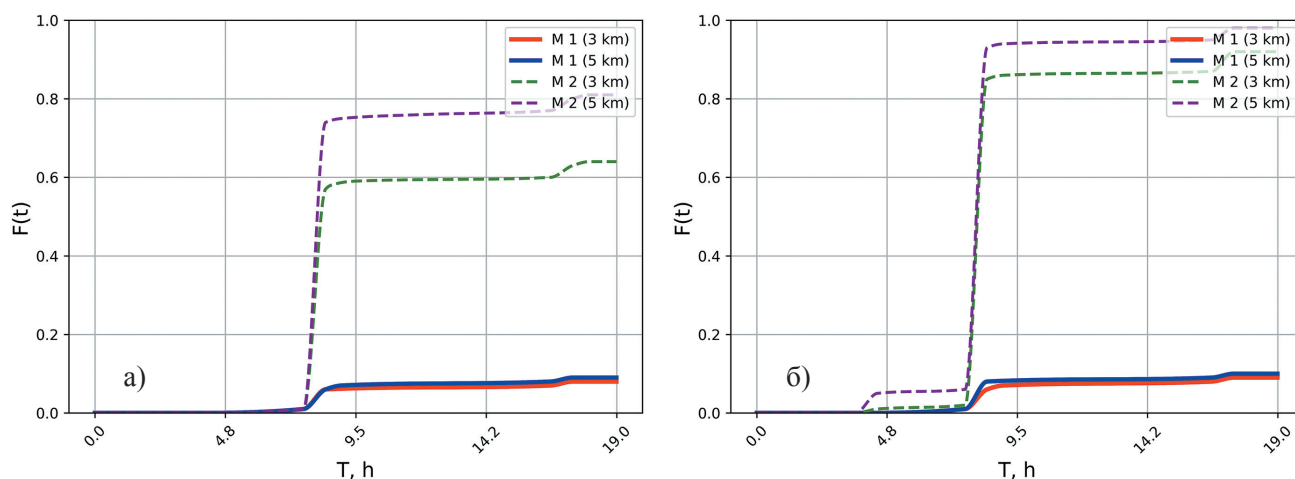


Рис. 8. Функция распределения времен достижения дозовых критериев с использованием методов 1 и 2 для зоны предупредительных мер (а) и зоны планирования срочных защитных мер (б) с минимальными и максимальными контрмерами

[Fig. 8. Cumulative distribution function of exceeding threshold dose values times using methodologies 1 and 2 for precautionary action zone (a) and urgent protective action planning zone (b) with minimum countermeasures]

(за пределами ЗПЗМ где-то всегда будет превышение). Первый метод фактически реализует принцип реалистичного моделирования, аналогичен подходу, используемому в [24], второй метод – более консервативен и соответствует [6]. С точки зрения поведения функции распределения одинаковы и имеют ступенчатую форму. Времена, на которых растет вероятность превышения дозовых критериев, соответствуют, как и в случае рассмотрения плотности вероятности для отдельной точки, пиковым значениям выброса. То есть оба метода позволяют получить характерные времена, когда достигаются критерии по дозе облучения. Упрощения в модели, сделанные для обеспечения разумных времен счета при многомерном анализе (реализация метеоусловий, пространство, динамика), не позволяют в полной мере учесть время доставки облака, однако размытие кривых на рис. 8 за счет этого фактора представляется незначительным (средняя скорость ветра – 5 м/с (18 км/ч)). Разрыв между кривыми в рамках одной модели определяется в первую очередь расстоянием от источника, что соответствует обратно пропорциональному снижению концентрации с расстоянием [5]. На ЗПМ значительное влияние оказывает исключенный из анализа водоем, поскольку часть реализаций распространения приходится не на селитебную территорию. Видно, что для ЗПМ разброс по вероятности между 3 и 5 км больше, чем для ЗПСМ между 15 и 30 км. Для ЗПСМ эффект значительно меньше, поскольку дозовые критерии для этой зоны ниже, а водоем примерно на этом расстоянии заканчивается.

### Выводы

Основы статистической обработки результатов моделирования, используемые в двух рассмотренных методах, широко используются в международной практике для анализа последствий аварийных выбросов и, в частности, для построения ЗПЗМ. По отношению к ранее используемым подходам была добавлена возможность анализа длительных тяжелых аварий с привязкой к динамике выброса в атмосферу и установленным дозовым критериям, что является новым подходом при проведении расчетов доз облучения при анализе безопасности и потенциально позволяет привязать результаты моделирования ко временам выполнения организационных мер по управлению авариями и национальному плану действий при радиационных чрезвычайных ситуациях.

На примере гипотетической тяжелой аварии с плавлением топлива на РУ с ВВЭР-1000 получено, что определение времени достижения дозовых пределов за пределами ЗПЗМ из [5] на основе пространственных огибающих прогнозируемых доз (метод 1) менее консервативно, чем определение времени достижения дозовых критериев, которое не будет превышено на границе окружности заданного радиуса и за ее пределами (метод 2). Отличия между результирующими вероятностями составляет 4–8 раз. Первый метод больше ориентирован на вопросы адресной защиты населения в случае тяжелой аварии и позволяет определить участки территории, где вероятности достижения дозовых критериев больше, чем на остальных участках,

что может быть связано с географическими особенностями местности или климатом региона расположения АЭС. Он позволяет учесть конкретные населенные пункты в стратегии защиты и определить приоритизацию проведения защитных мер с учетом времен и возможности превышения дозовых критериев. Второй метод более консервативен и рассматривает последствия как единое целое. При его использовании можно выделить только расстояния, меры защиты для которых должны выполняться безотносительно направления при отсутствии дополнительных источников данных (мониторинг, прогноз). Для масштабных аварий, когда применение мер защиты может носить масштабный характер, его практическое применение может быть избыточно, поскольку стратегия защиты населения, представленная МАГАТЭ, прежде всего, ориентирована на достижимость планов, а не на консервативность.

Поведение функций распределения, полученных по обоим методам, в отличие от распределения доз, отражает динамику выброса и характерные времена, когда происходят существенные с точки зрения радиационной безопасности населения выбросы. Показано, что оба метода за счет формы распределения позволяют получить сопоставимую пространственно-временную информацию о запасах времени на проведение мер защиты населения в случае тяжелой аварии с плавлением топлива. Применение в задачах обоснования безопасности данных методов позволит уточнить планы по защите населения, а также применить понятие раннего и позднего аварийных выбросов в практических задачах. Например, планы мероприятий по защите персонала и населения на площадке АЭС с учетом окончательного перечня запроектных аварий могут быть уточнены и «синхронизированы» с временными регламентами на выполнение мер защиты населения. В качестве примера приведем национальный план мероприятий в случае радиационной аварийной ситуации Республики Турции [38], учитывающий укрытие в течение двух часов после выявления события на объекте и эвакуацию в течение суток. Таким образом, открывается возможность к оптимизации стратегий защиты населения с учетом регламента развертывания сил и средств для ликвидации последствий аварии.

В части совершенствования нормативно-правовой базы результаты настоящей статьи могут быть применены как практическая реализация концепций определения раннего и позднего больших аварийных выбросов, предложенная в статье [39].

Кроме этого, предложенные в данной статье модели могут быть использованы при обосновании требований НП-032-19 [2] по оценке транспортных коммуникаций и возможности проведения укрытия, йодной профилактики и эвакуации населения, проживающего в области возможного загрязнения. Полученные результаты могут использоваться для целей развития методов вероятностного анализа безопасности, подготовки и анализа сценариев из представительных аварий для включения в планы по защите населения и персонала, а также совершенствования организационных мер по управлению авариями, разрабатываемых в рамках руководств по управлению тяжелыми авариями.

Следует также отметить, что установленные в стандартах безопасности МАГАТЭ [23] и НРБ-99/2009 [20] времена расчета доз для сравнения с дозовыми критериями, с одной стороны, являются определенными значениями, однако, с другой стороны, на практике их применение зависит от задач.

Так, дозовые критерии и периоды расчета доз, используемые МАГАТЭ в модели расчета ЗПЗМ [5], отличаются от соответствующих в GSR-3 [23]. В отечественной практике, в соответствии с комментариями к НРБ-99/2009 [21], 10 суток выбрано *«как предполагаемый максимальный период времени после возникновения аварии, когда уже не ожидается ухудшения радиационной обстановки»*.

В методике [22] о построении ЗПЗМ рассматриваются периоды времени *«после аварии»*, такой подход гарантирует консервативность оценок. Возможность увеличения времен превышения дозовых критериев при оценке дозы также показано и в D-Values [40] МАГАТЭ при рассмотрении применения двухсуточных дозовых критериев. При этом аварии на бассейнах выдержки могут приводить к длительным выбросам, для которых оперативность введения мер защиты должна определяться условиями протекания аварии, поскольку попытки применить неотложные меры защиты могут привести к большему вреду. В таком контексте модели оценки времен достижения дозовых критериев позволили бы оптимизировать защиту населения. Если нормативные времена достижения дозовых критериев рассматривать как жесткие, то в случае отложенного выброса с разрушением защитной оболочки и значительным залповым выбросом в атмосферу через трое суток после возникновения постулируемого иницирующего события утверждать, что двухсуточные дозы равны нулю, не корректно с точки зрения основных целей обеспечения радиационной безопасности населения.

С учетом представленных особенностей, применение методов расчета времен достижения критериев в задачах анализа радиационной безопасности представляется важным этапом развития научно-методических подходов к обоснованию и обеспечению радиационной безопасности.

### Литература

1. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (НП-001-15): утв. приказом Ростехнадзора от 17.12.2015 № 522.
2. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Площадка атомной станции. Требования безопасности. НП-032-19: утв. приказом Ростехнадзора от 19.07.2019 № 287.
3. European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants, Revision D, December 2012.
4. Букринский А. М., Ланкин М. Ю., Шарафутдинов Р. Б., Мирошниченко М. И., Сидоренко В. А. Обновленные общие положения обеспечения безопасности АС введены в действие // Ядерная и радиационная безопасность. 2016. № 2 (80). С. 1–8.
5. 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.
6. 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: 30.05.2025).
7. Hoe, S., McGinnity, P., Charnock, T., Gering, F., Schou Jacobsen, L. H., Havskov Sørensen, J., ... Astrup, P. (2009). ARGOS Decision support system for emergency management. In Proceedings (online) Argentine radiation protection society.
8. 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://cris.vtt.fi/en/publications/valma-extension-with-ingestion-doses-assessment> (дата обращения: 30.05.2025).
9. Daniel, Clayton, Nathan, E., Bixler., K. L., Compton (2022). HYSPLIT/MACCS Atmospheric Dispersion Model Technical Documentation and Benchmark Analysis. DOI: 10.2172/1865261.
10. 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.
11. Отчет о верификации и обосновании программного средства «Программа для расчета радиационной обстановки в мезомасштабе. Версия 1.1 (ПОМ)». – М.: ИБРАЭ РАН, 2017. – 231 с.
12. Программа ДОЗА-М, версия 2. Аттестационный паспорт программного средства № 574 от 05.12.2025.
13. 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.
14. Kiselev, A. A. (2023). Analysis of the national and international framework for the EPZ establishment including harmonization and applicability for next generation reactors. Nuclear Engineering and Design 414, 112655. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2023.112655.
15. 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.2023.109.3.001.
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. Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risks in U. S. Commercial Nuclear Power Plants (NUREG-75/014), Appendix VI, 1975.
18. Operational intervention levels for reactor emergencies and methodology for derivation. EPR-NPP-OILs, ISSN 2518–685X; No. 479. – IAEA, Vienna, 2017.
19. Нормы безопасности МАГАТЭ. Общие требования безопасности No. GSR Part 7. Готовность и реагирование в случае ядерной или радиологической аварийной ситуации. – Вена, МАГАТЭ, 2016.

20. 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.
21. 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.
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 от 16.07.2013 № 9/656-П.
23. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности. Общие требования безопасности. Серия норм МАГАТЭ по безопасности No. GSR Part 3. – Вена: МАГАТЭ, 2014. – 471 с.
24. T. Peltonen, F. Gering, K. Arnold, T. Duranova, A. Bujan, J. Duran, L. Bohun, M. Montero, C. Trueba (2016). Emergency preparedness for long lasting releases – assessment of radiological consequences. Radioprotection, No. 51 (HS2), pp. 79–81.
25. Straume, A. G. (2001). A more extensive investigation of the use of ensemble forecasts for dispersion model evaluation. Journal of applied meteorology, No. 40 (3), pp. 425–445.
26. Sørensen, J. H. et al. (2017). NKS research on uncertainty of atmospheric dispersion prediction – results of MUD, FAUNA, MESO and AVESOME, CONFIDENCE Ensemble Workshop – Paris.
27. Арутюнян Р. В., Бакин Р. И., Киселев А. А., Краснопёров С. Н., Шведов А. М., Шикин А. В., Шинкарёв С. М. Константное обеспечение для расчета доз облучения населения: обзор // Радиация и риск. 2018. Т. 27. № 3. С. 91–103.
28. Бакин Р. И. и др. Вычислительные ошибки при расчете длинных цепочек радиоактивного распада // Атомная энергия. 2017. Т. 123. № 6. С. 334–338.
29. Арутюнян Р. В., Бакин Р. И., Киселев А. А., Краснопёров С. Н., Шведов А. М., Шикин А. В., Шинкарёв С. М. Об использовании дозовых коэффициентов в программных комплексах оценки и прогнозирования радиационной обстановки при аварийных ситуациях // Радиация и риск (Бюллетень НРЭР). 2019. Т. 28. № 1. С. 92–102.
30. Leonid A. Bolshov, Kirill S. Dolganov, Arkady E. Kiselev, Valery F. Strizhov. (2019). Results of SOCRAT code development, validation and applications for NPP T safety assessment under severe accidents. Nuclear Engineering and Design, v. 341, pp. 326–345.
31. ИИЕС Руководство для пользователей международной шкалы ядерных и радиологических событий Издание 2008 года. – Вена: МАГАТЭ, 2013.
32. Нормы безопасности МАГАТЭ. Общие требования безопасности No. GSR Part 4 (Rev. 1). Оценка безопасности установок и деятельности. – Вена: МАГАТЭ, 2016.
33. Нормы безопасности МАГАТЭ. Руководство по безопасности No. GS-G-2.1. Меры по обеспечению готовности к ядерной или радиологической аварийной ситуации. – Вена: МАГАТЭ, 2016.
34. Emery, C., Tai, E., Yarwood, G. (2001). Final Report. Enhanced meteorological model and performance evaluation for two Texas ozone episodes. Work Assignment No. 31984-11 TNRC Umbrella Contract N. 582-0-31984; ENVIRON International Corporation 101 Rowland Way, Suite 220 Novato, CA, p. 153.
35. NCAR/MMM, 2018. MODIS landcover database. WPS V4 Geographical Static Data Downloads Page. – URL: <https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/> (дата обращения: 30.05.2025).
36. NASA, 2017. SRTM 90 m Digital Elevation Database v4.1: 2017. – URL: <https://csidotinfo.wordpress.com/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1> (дата обращения: 30.05.2025).
37. Slade, D. H. (1968). Meteorology and atomic energy, 1968. – URL: <https://doi.org/10.2172/4492043>.
38. Turkey's National Radiation Emergency Response Plan, URAP, TAEK, Ankara, 2015.
39. Любарский А. В., Токмачёв Г. В., Михалёв А. В. Большой ранний аварийный выброс – что это такое и нужен ли он в нормах РФ? // Известия вузов / Ядерная энергетика. 2024. № 4. С. 81–94. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.4.07>.
40. Dangerous quantities of radioactive material (D-values), emergency preparedness and response. EPR-D-VALUES 2006. – Vienna: IAEA, 2006.

## References

1. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoi ehnergii "Obshchie polozheniya obespecheniya bezopasnosti atomnykh stantsii" (NP-001-15) [Federal norms and rules in the field of use of atomic energy "General provisions for ensuring the safety of nuclear power plants" (NP-001-15)]. 2015.
2. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj ehnergii "Ploshchadka atomnoj stantsii. Trebovaniya bezopasnosti" (NP-032-19) [Federal Standards and Rules in the Field of Atomic Energy Use "Nuclear power plant site. Safety requirements" (NP-032-19)]. 2019.
3. European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants, Revision D, December 2012.
4. Bukrinsky A. M., Lankin M. Yu., Sharafutdinov R. B., Miroshnichenko M. I., Sidorenko V. A. (2016). Obnovlennye obshchie polozheniya obespecheniya bezopasnosti AS vvedeny v deistvie [Updated general provisions for ensuring NPP safety have been put into effect]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety Journal*, No. 2 (80), pp. 1–8. [in Russian].
5. 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.
6. 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: 30.05.2025).
7. Hoe, S., McGinnity, P., Charnock, T., Gering, F., Schou Jacobsen, L. H., Havskov Sørensen, J., ... Astrup, P. (2009). ARGOS Decision Support System for Emergency Management. In Proceedings (online) Argentine Radiation Protection Society.
8. 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://cris.vtt.fi/en/publications/valma-extension-with-ingestion-doses-assessment> (reference date: 30.05.2025).
9. Daniel, Clayton., Nathan, E., Bixler., K. L., Compton (2022). HYSPLIT/MACCS Atmospheric dispersion model technical documentation and benchmark analysis. DOI: 10.2172/1865261.
10. 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.
11. Otchet o verifikatsii i obosnovanii programmnoy sredstva "Programma dlya rascheta radiatsionnoi 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].
12. DOZA-M software, version 2. Software certification passport No. 574 dated December 5, 2022.
13. Kharchenko, E. V. (2016). Ispol'zovanie matematicheskikh modelei perenosa i rasseyaniya radionuklidov v atmosfere dlya upravleniya riskami na stadii proektirovaniya atomnykh ehlektrostantsii [Use of mathematical models of transport 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].
14. Kiselev, A. A. (2023). Analysis of the national and international framework for the EPZ establishment including harmonization and applicability for next generation reactors. *Nuclear Engineering and Design* 414, 112655. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2023.112655.
15. Kiselev A. A. (2023). Sravnitel'nyi analiz razmerov zon planirovaniya zashchitnykh meropriyatii dlya dvukh gipoteticheskikh radiatsionnykh avarii [Comparative analysis of protective action planning zones for two hypothetical radiation accidents]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety Journal*, No. 3 (109), pp. 36–49. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2023.109.3.003.
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. Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risks in U. S. Commercial Nuclear Power Plants (NUREG-75/014), Appendix VI, 1975.

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

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

20. 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.

21. 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].

22. Metodika opredeleniya razmerov zon planirovaniya zashchitnykh meropriyatiy 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. Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards. General safety requirements. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. Vienna: IAEA, 2014. 471 p.

24. T. Peltonen, F. Gering, K. Arnold, T. Duranova, A. Bujan, J. Duran, L. Bohun, M. Montero, C. Trueba (2016). Emergency preparedness for long lasting releases – assessment of radiological consequences, Radioprotection, No. 51(HS2), pp. 79–81.

25. Straume, A. G. (2001). A more extensive investigation of the use of ensemble forecasts for dispersion model evaluation. Journal of applied meteorology, 40 (3), pp. 425–445.

26. Sørensen, J. H. et al. (2017). NKS research on uncertainty of atmospheric dispersion prediction – results of MUD, FAUNA, MESO and AVESOME, CONFIDENCE Ensemble Workshop – Paris.

27. 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].

28. Bakin R. I. et al. (2017). Vychislitel'nye oshibki pri raschete dlinnykh tsepochk radioaktivnogo raspada [Computational errors in calculating long radioactive decay chains]. Atomnaya ehnergiya – Atomic energy, v. 123, No. 6, pp. 334–338. [in Russian].

29. 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].

30. Leonid A. Bolshov, Kirill S. Dolganov, Arkady E. Kiselev, Valery F. Strizhov (2019). Results of SOCRAT code development, validation and applications for NPP T safety assessment under severe accidents. Nuclear Engineering and Design, v. 341, pp. 326–345.

31. INES User's Guide to the International Nuclear and Radiological Event Scale. 2008 edition. – Vienna, IAEA, 2013.

32. IAEA Safety Standards. General Safety Requirements No. GSR Part 4 (Rev. 1). Safety Assessment of Facilities and Activities. – Vienna, IAEA, 2016.

33. IAEA Safety Standards. Safety Guide No. GS-G-2.1. Arrangements for Preparedness for a Nuclear or Radiological Emergency. – Vienna, IAEA, 2016.

34. Emery, C., Tai, E., Yarwood, G. (2001). Final Report. Enhanced meteorological model and performance evaluation for two Texas ozone episodes. Work Assignment No. 31984-11 TNRCC Umbrella Contract N., 582-0-31984; ENVIRON International Corporation 101; p. 153.

35. NCAR/MMM, 2018. MODIS landcover database. WPS V4 Geographical Static Data Downloads Page. URL: <https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/> (reference date: 30.05.2025).

36. NASA, 2017. SRTM 90m Digital Elevation Database v4.1: 2017. URL: <https://csidotinfo.wordpress.com/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1> (reference date: 30.05.2025).

37. Slade, D. H. (1968). Meteorology and atomic energy, 1968. URL: <https://doi.org/10.2172/4492043>.

38. Turkey's National Radiation Emergency Response Plan, URAP, TAEK, Ankara, 2015.

39. Lyubarskiy, A. V., Tokmachev, G. V., & Mikhalev, A. V. (2024). Bol'shoi rannii avariinyi vybros – chto ehto takoe i nuzhen li on v normakh RF? [Large early accidental release – what is it and is it needed in RF standards?] *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika – Nuclear Energy and Technology*, No. 4, pp. 81–94. [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.4.07>.

40. Dangerous quantities of radioactive material (D-values), emergency preparedness and response. EPR-D-VALUES 2006. Vienna: IAEA, 2006.

### Сведения об авторах

*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, Большая Тульская ул., д. 52).

*Коняев Павел Андреевич*, инженер, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук» (ИБРАЭ РАН) (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52).

*Зайцева Анастасия Александровна*, инженер, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук» (ИБРАЭ РАН) (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52).

### Authors 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 Street, Moscow, 115191), e-mail: [aak@ibrae.ac.ru](mailto:aak@ibrae.ac.ru).

*Konyaev Pavel Andreevich*, Engineer, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (IBRAE RAN) (52, Bolshaya Tulsкая Street, Moscow, 115191), e-mail: [konyaev@ibrae.ac.ru](mailto:konyaev@ibrae.ac.ru).

*Zaitseva Anastasia Aleksandrovna*, Engineer, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (IBRAE RAN) (52, Bolshaya Tulsкая Street, Moscow, 115191), e-mail: [zaitseva@ibrae.ac.ru](mailto:zaitseva@ibrae.ac.ru).

### Для цитирования

*Киселев А. А., Коняев П. А., Зайцева А. А.* Модель оценки времен достижения дозовых критериев облучения населения по международным стандартам в задачах обоснования безопасности АЭС // Ядерная и радиационная безопасность. 2025. № 2 (116). С. 39–56. DOI: [10.26277/SECNRS.2025.116.2.003](https://doi.org/10.26277/SECNRS.2025.116.2.003).

### For citation

*Kiselev A. A., Konyaev P. A., Zaitseva A. A.* (2025). Model' otsenki vremen dostizheniya dozovykh kriteriev oblucheniya naseleniya po mezhdunarodnym standartam v zadachakh obosnovaniya bezopasnosti AEHS [Model to assess the times of exceeding dose criteria for the population in accordance with international safety analysis recommendations]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety Journal*, No. 2 (116), pp. 39–56. [in Russian]. DOI: [10.26277/SECNRS.2025.116.2.003](https://doi.org/10.26277/SECNRS.2025.116.2.003).

