УДК 658.345

# МЕТОДЫ АНАЛИЗА РИСКА НА РАННЕЙ ФАЗЕ РАДИАЦИОННОЙ АВАРИИ

# METHODS OF RISK ASSESSMENT AT EARLY STAGE OF RADIATION ACCIDENT

Валерий Иванович Ларионов, Анатолий Александрович Александров, Сергей Петрович Сущев

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Valeriy I. Larionov, Anatoliy A. Aleksandrov, Sergey P. Sushchev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

e-mail: lar@esrc.ru

Аннотация. В современном мире атомная энергетика по-прежнему выгодным и привлекательным остается экономически экологически элементом энергосистемы государства, с каждым голом ширится применение радиационных и ядерных технологий. При этом ядерные энергетические установки (реакторы) относятся к потенциально опасным объектам и представляют угрозу возникновения аварий с выбросом радиоактивных веществ за пределы промышленной площадки. Для обеспечения их безопасности, защиты персонала и населения, минимизации последствий воздействия на окружающую среду используется концепция глубокоэшелонированной защиты, которая предполагает использование физических барьеров и систем организационных и технических мер. На разных этапах жизненного цикла радиационно опасного объекта возникает необходимость решения задач анализа риска возможного вреда, причиненного дополнительным к естественному радиационному фону облучением,



проведения расчетов параметров радиационной обстановки и дозовых нагрузок на персонал и население, выработки рекомендаций по применению защитных инженерно-технических и организационных мероприятий. Такие расчеты требуют актуализации и доработки методической базы анализа риска аварий и могут проводиться с помощью современных комплексных программных средств, которые могут включать как модели распространения радионуклидов в атмосфере, так и модели учета прогностических дозовых нагрузок на персонал и население и снижения их в результате проведения защитных мероприятий на объекте и территории.

Предложенное в статье совершенствование методической базы в области анализа риска аварий с выбросом радиоактивных веществ на ранней фазе радиационной аварии выполнено путем учета особенностей формирования зон загрязнения при авариях на ядерных энергетических установках. Разработаны методы оценки и анализа радиационных рисков в процессе функционирования радиационно опасного объекта, а также общая схема управления ими. Предложены первоочередные мероприятия, которые необходимо реализовать для создания эффективной системы управления радиационными рисками на радиационно опасном объекте. Полученные результаты имеют практическое значение, поскольку использованы при разработке алгоритмов, а также программных средств по определению рисков аварий с выбросом радиоактивных веществ для автоматизированной информационно-управляющей системы Национального центра управления в кризисных ситуациях.

**Abstract.** Nowadays nuclear energy remains economically profitable and environment friendly element of the state's energy system. The use of radiation and nuclear technologies increases every year. However, nuclear power plants (reactors) are potentially hazardous facilities and represent threat of emergencies with the release of radioactive substances from the industrial site. The defense in-depth concept is used to ensure the safety, protect personnel and the public, minimize the impact on the environment. It consists of using physical barriers and systems of



organizational and technical measures. There is necessity to solve the tasks of risk assessment of possible harm caused by additional radiation (plus to natural background radiation), to analyze of radiation situation and radiation doses on personnel and the population, and to develop the guidelines for implementation of safety engineering and technical and management actions on different stages of radiation-hazardous facility life cycle. Such calculations require updating and adjustment of the methodological basis of emergency risk assessment and can be carried via modern integrated software tools that can include both models of radionuclides' dispersal in the atmosphere and models of prognostic radiation doses on personnel and population and their decrease due to protective measures on site.

The methodological base improvement, suggested in the article, in the field of risk assessment of emergencies with the release of radioactive substances at the early phase of radiation emergency was carried out with considering the features of contamination zones formation during emergencies on nuclear power plants. Methods for radiation risks assessment and analysis in the process of radiation-hazardous facility operation as well as general approaches for its management have been developed. Basic measures that should be implemented to create effective radiation risk management system on radiation-hazardous facility are presented. Obtained results have practical importance as they are used in the development of algorithms and software tools on determining the risks of emergencies with radioactive substances release for the management information system of the National Emergency Management Center.

**Ключевые слова:** промышленная безопасность, радиационно опасный объект, радиационная авария, ионизирующее излучение, радиоактивное загрязнение, радиационное поражение, доза облучения, оценка риска аварий, риск-ориентированный подход

**Keywords:** industrial safety, radiation-hazardous facility, radiation accident, ionizing radiation, radiological contamination, radiological damage, radiation dose, emergencies risk assessment, risk-based approach



#### Введение

Интенсивное развитие атомной энергетики и широкое использование разнообразных источников радиации в науке, медицине, сельском хозяйстве, промышленности сопряжено с высоким риском возникновения аварий. Радиационные аварии и катастрофы по масштабам своих последствий занимают особое место среди техногенных аварий и катастроф, так как оказывают негативное влияние на безопасность и здоровье большого количества людей, требуют значительных и долговременных затрат на обеспечение населения и реабилитацию пострадавших социальное территорий. Самые масштабные последствия вызывают аварии на атомных электростанциях (ядерных реакторах). Так, авария на Чернобыльской атомной электростанции (СССР, 1986 г.) – величайшая ядерная катастрофа истории человечества – привела к беспрецедентному выбросу окружающую среду. Выброшенные из радиоактивных веществ в разрушенного реактора в атмосферу продукты деления ядерного топлива были разнесены воздушными потоками на значительные территории, обусловив их радиоактивное загрязнение не только вблизи АЭС в границах Украины, России и Белоруссии, но и за сотни и даже тысячи километров от места аварии. Радиоактивному загрязнению подверглись территории многих стран. На территории России радиоактивное загрязнение от аварии на Чернобыльской АЭС затронуло 21 административный субъект, общая площадь, подвергшаяся загрязнению, составила более 55 тыс. км<sup>2</sup>.

Важными элементами обеспечения безопасности АЭС и укрепления доверия общественности к ее безопасной эксплуатации являются не только надзор и контроль выполнения работ, влияющих на безопасность, эффективная и надежная работа всех систем, повышение культуры безопасности персонала и руководящего звена, но и изучение закономерностей формирования зон риска радиоактивного излучения и



процессов облучения людей при аварии на радиационно опасном объекте (РОО), в том числе на ранней фазе радиационной аварии, которая характеризуется наиболее интенсивным воздействием на население. При комплексном решении проблем радиационной безопасности ключевым понятием становится риск[1]. Оценка риска чрезвычайной ситуации (ЧС) при анализе безопасности функционирования потенциально опасных объектов позволит своевременно принять меры по защите населения и территорий. Однако существующая методическая база в области оценки и анализа риска радиационных аварий требует дальнейшего совершенствования.

Оценка риска ЧС на радиационно опасном объекте включает следующие основные действия: идентификацию потенциальных опасностей радиационной аварии (определение степени загрязнения окружающей среды радиоактивными веществами); формирование сценариев возникновения и развития рисков аварии; количественную оценку риска и определение степени допустимости и/или приемлемости уровней риска.

# Общие положения метода расчета радиоактивного загрязнения

Потеря управления над источником ионизирующего излучения (радиационная авария), вызываемая рядом причин (неисправностью оборудования, действиями неправильными персонала, стихийными бедствиями и пр.), может привести к присутствию радиоактивных веществ в окружающей среде и облучению людей в количествах, превышающих уровни, установленные нормами радиационной безопасности и правилами работы с радиоактивными веществами. Радиоактивные вещества (РВ), выброшенные в атмосферу, распространяются в дальнейшем ветровым потоком от источника выброса на значительные расстояния, перемешиваясь подстилающую осаждаясь на поверхность В зависимости метеорологических условий. Концентрация радиоактивной примеси в приземном слое воздуха является исходным параметром, определяющим



ингаляционное поступление радионуклидов в организм человека и последующее внутреннее облучение, а также внешнее облучение человека от радиоактивного облака. То есть радиоактивное загрязнение окружающей среды является исходным звеном в дальнейшей цепочке путей (ингаляционный, пероральный, кожно-резорбтивный) облучения человека.

При прогнозе радиационной обстановки для планирования и осуществления мер по радиационной защите населения, оценке доз облучения населения необходимо учитывать как уровень опасности аварии на АЭС по международной шкале ядерных и радиологических событий ИНЕС [2], так и фазы развития аварии: раннюю, промежуточную, позднюю (восстановительную) (таблица 1) [3,4], поскольку хронология развития ЧС радиационного характера и факторов радиационного воздействия показывает, что введение мер радиационной защиты является наиболее эффективным именно на ранней фазе аварии.

Так, авария 7-го уровня по шкале ИНЕС – крупная (глобальная) авария – может развиваться по следующему сценарию. Масса расплавленного топлива может попасть в нижнюю часть корпуса реактора, заполненную водой.

**Таблица 1.** Фазы развития аварии на атомной станции **Table 1.** Emergency development phases at nuclear power plant

Характе- ристика	Ранняя	Промежуточная	Поздняя
Длитель- ность фазы	От начала аварии до прекращения выброса PB и формирования полей радиоактивности (до нескольких суток/недель)	От формирования полей радиоактивности до завершения экстренных мер по защите населения (до 1 года)	От выполнения необходимых мер защиты до полной безопасности территории (несколько лет)
Характер загрязне- ния	Загрязнение территории от газоаэрозольного облака и смеси радионуклидов в воздухе, на грунте, в воде. Формирование радиоактивного следа	Формирование радиоактивных полей	Ослабление радиоактивных полей за счет дезактивации территорий и распада радиоактивных веществ



Характе- ристика	Ранняя	Промежуточная	Поздняя
Характер облучения населения	<ul><li>Внутреннее (ингаляционное, пероральное);</li><li>внешнее (от облака и загрязненной местности)</li></ul>	<ul><li>Внутреннее (ингаляционное, пероральное)</li><li>внешнее (от загрязненной местности)</li></ul>	<ul><li>Внутреннее (пероральное)</li><li>внешнее (от загрязненной местности)</li></ul>
Меры по защите населения и территорий	<ul> <li>Контроль обстановки;</li> <li>экстренная эвакуация населения из 30-км зоны;</li> <li>йодная профилактика;</li> <li>применение СИЗ;</li> <li>медицинская помощь пострадавшим</li> </ul>	<ul> <li>Радиационный контроль;</li> <li>общая эвакуация населения из 30-км зоны, санитарная обработка;</li> <li>использование СИЗ;</li> <li>охрана загрязненных зон;</li> <li>обеспечение населения продуктами питания</li> </ul>	<ul> <li>Радиационный контроль;</li> <li>отселение, отчуждение;</li> <li>дезактивация территорий;</li> <li>санитарнопрофилактические мероприятия</li> </ul>

Взаимодействие расплавленных тепловыделяющих элементов (твэлов) — главных конструктивных элементов активной зоны ядерного реактора, содержащих ядерное топливо, — с водой приводит к образованию взрывоопасной паровоздушно-водородной смеси. В результате взрыва этой смеси происходит разрушение корпуса реактора и диспергирование (рассеяние) топливных масс, что приводит к мгновенному выбросу в атмосферу большой массы мельчайших фрагментов ядерного топлива на высоту выше пограничного слоя атмосферы (1,0–1,5 км). Из оставшейся в разрушенном реакторе топливной массы происходит истечение (выброс) радиоактивных веществ в атмосферу на высоту до нескольких сотен метров в зависимости от температуры активной зоны и типа реактора. При этом возможен трансграничный перенос радиоактивных веществ.

Для примера в таблице 2 приведены качественный и количественный радионуклидный состав, суммарная активность радионуклидов в выбросе при аварии 7-го уровня на АЭС по шкале ИНЕС [2].



**Таблица 2.** Выброс радионуклидов в атмосферу при аварии 7-го уровня на АЭС по шкале ИНЕС (фрагмент)

**Table 2.** Radionuclides' release into the atmosphere at level 7 emergency on NPP according to INES scale (*fragment*)

Радионуклид		Содержание радионуклидов в активной зоне, 10 <sup>17</sup> , Бк		Выход радионуклидов в атмосферу, 10 <sup>17</sup> , Бк	
		BBЭP-1000	РБМК-1000	BBЭP-1000	РБМК-1000
Йод	$^{131}I$	32	32	16	16
Рутений	<sup>106</sup> Ru	17	28	0,19	0,19
Цезий	<sup>137</sup> Cs	3,3	5,6	1,7	1,7
Церий	<sup>144</sup> Ce	37	49	0,33	0,33
Стронций	<sup>90</sup> Sr	2,4	3,8	0,34	0,34

*Примечание.* ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор; РБМК – реактор большой мощности канальный.

При определении загрязнения окружающей степени среды радиоактивными веществами, поступающими в атмосферу в результате аварии на АЭС, рассчитывают суммарные концентрации РВ в атмосфере и плотности загрязнения за счет выпадения радионуклидов на поверхности. При этом учитывают, что при аварии на объекте в зависимости от сценария ее развития происходит либо мгновенный выброс облака радиоактивных веществ, либо выброс серии последовательных радиоактивных облаков с некоторым временным интервалом между ними, что на перенос, рассеяние осаждение радиоактивного облака (облаков) существенно влияют радионуклидный состав выброса, мощность источника, а также локальные значения метеорологических параметров [3].

Атмосферная диффузия приводит к быстрому распространению РВ вблизи источника выброса, а воздушные течения могут переносить их на значительные расстояния. Поэтому моделирование переноса и рассеяния отдельного облака основано на решении нестационарного трехмерного уравнения турбулентной диффузии для мгновенного точечного источника. Это позволяет учесть временную и пространственную неоднородность метеоусловий.



В качестве исходных данных при моделировании радиоактивного загрязнения в результате аварий на АЭС используются показатели: координаты объекта; типы, количество и мощность ядерных реакторов; тип радиоактивного вещества; доля выброшенных радиоактивных веществ; время разрушения реактора; метеорологические характеристики.

Выброс РВ в атмосферу от точечного источника конечного времени действия моделируется совокупностью облаков РВ, поступающих в атмосферу с интервалом времени  $\Delta t$  в течение всего времени действия источника  $t_{\text{ист}}$ . Количество облаков определяется продолжительностью действия источника:  $n = \max(1, [t_{\text{ист}}/\Delta t])$ , где  $[t_{\text{ист}}/\Delta t] - \text{целая}$  часть отношения  $t_{\text{ист}}/\Delta t$ . Принимается, что i-е облако с активностью выброса  $Q_i$  поступает в атмосферу в момент времени  $t_i = t_{\text{H}} + (i-1)\Delta t$  (i = 1, 2, ..., n;  $t_{\text{H}}$  – время начала действия источника).

Концентрация PB в атмосфере, Бк/м<sup>3</sup>, определяется суммированием соответствующих концентраций, создаваемых каждым из облаков:

$$q(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^{n} q_i(x, y, z, t; t_i),$$
(1)

где t — текущее время;

 $q_i(x, y, z, t; t_i)$  — концентрация радионуклидов в i-м облаке.

Концентрация РВ в i-м облаке с активностью выброса  $Q_i$  определяется из выражения

$$q_{i}(x, y, z, t; t_{i}) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < t_{i}, \\ Q_{i} \ q_{1}(x, y, t; t_{i}) \ q_{2}(z, t; t_{i}) & \text{при } t \geq t_{i}; \end{cases}$$
 (2)

где  $q_1(x, y, t; t_i)$  — функция, учитывающая перенос и рассеяние РВ по горизонтали, его химическое превращение или радиоактивный распад и вымывание осадками;

 $q_2(z, t; t_i)$  — функция, определяющая рассеяние PB по вертикали, его оседание и осаждение.



Расчет переноса и рассеяния i-го облака продолжается вплоть до времени, необходимого для полного рассеяния, выпадения или распада PB.

Приземная воздушная концентрация на площадке с координатами (x, y) находится путем интегрирования концентрации РВ в i-м облаке по времени и последующего суммирования:

$$q_{\text{np}}(x, y, t) = \sum_{i=1}^{n} \int_{t_i}^{t} q_i(x, y, \overline{z}, t; t_i) dt, \qquad (3)$$

где  $\overline{z}$  – высота уровня дыхания, м (принимается равной 1,5 ± 0,5 м).

Облако, образующееся при авариях на РОО, представляет собой дисперсию радионуклидов. Перемещаясь по направлению ветра, оно обуславливливает радиоактивное загрязнение местности. Приземная воздушная концентрация за время прохождения облака должна определяться для каждого радионуклида в отдельности [5].

# Вероятность радиационного поражения

При воздействии ионизирующего излучения на организм человека в происходить физические, тканях сложные химические биологические процессы. Характер этого воздействия определяется дозой ионизирующего излучения. При аварии на РОО дозы облучения населения, в соответствии с методическими указаниями [6], определяются с учетом групп населения (в зависимости от возраста, профессии, типа помещения), воздействию, радиационному качественного подвергшегося количественного состава радионуклидов в выбросе и характера облучения (внешнее и внутреннее).

**Дозовые критерии.** Для оценки радиационного поражения человека приняты следующие дозовые критерии.

Поглощенная доза — энергия ионизирующего излучения, поглощенная единицей массы облучаемого вещества. В системе СИ единицей поглощенной дозы является грей (Гр): 1 Гр = 1 Дж/кг = 100 рад.



Эквивалентная доза (поглощенная доза в биологической ткани) — величина воздействия ионизирующего излучения, используемая для определения степени ионизации биологической ткани с учетом вида излучения. Равна произведению поглощенной дозы в органе или ткани на взвешивающий коэффициент, соответствующий данному виду излучения. При воздействии различных видов излучений определяется как сумма эквивалентных доз для этих видов излучений. Системной единицей измерения эквивалентной дозы принят зиверт (Зв): 1 Зв = 100 бэр.

Эффективная доза — величина воздействия ионизирующего излучения, используемая как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения организма человека и отдельных его органов с учетом их радиочувствительности. Единица измерения — Зв.

**Доза внешнего облучения.** При определении дозы внешнего облучения учитываются возможные пути облучения: от радиоактивного облака и/или от загрязненной местности (см. таблицу 1).

Значение эквивалентной дозы внешнего облучения населения при погружении в радиоактивное облако рассчитывается по формуле

$$E_1^{\text{обл}} = KT \sum_r C_r e_r, \tag{4}$$

где K — коэффициент перехода от дозы в воздухе на высоте 1 м над подстилающей поверхностью к дозе в биологической ткани для представителей разных групп населения при облучении от радиоактивного облака, мЗв/мГр (для взрослого населения принимается равным 0,7 мЗв/мГр, для детей школьного возраста — 0,75 мЗв/мГр, для дошкольников — 0,85 мЗв/мГр);

T – время облучения от данного источника, ч;

 $C_r$  — средняя концентрация радионуклида r в приземном слое воздуха за время прохождения радиоактивного облака, кБк/м<sup>3</sup>;

 $e_r$  — дозовый коэффициент, численно равный мощности поглощенной дозы гамма-излучения радионуклида r на высоте 1 м над подстилающей



поверхностью от источника в виде радиоактивного облака,  $(M\Gamma p/4)/(\kappa E k/M^3)$  [6].

Доза  $E_1^{\text{пов}}$  внешнего облучения населения от радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности рассчитывается по методике оценки доз облучения населения при радиоактивном загрязнении территории [6].

**Доза внутреннего облучения.** Оценку внутреннего облучения населения проводят с учетом поступления радионуклидов в организм человека с воздухом и продуктами питания (см. таблицу 1).

Значение ожидаемой эквивалентной дозы внутреннего облучения населения от ингаляции рассчитывают с учетом концентрации радионуклидов в воздухе и продолжительности ингаляции по формуле

$$E_2^{\text{uhr}} = 10^{-6} T \sum_r C_r h_r V, \tag{5}$$

где  $h_r$  — дозовый коэффициент для разных групп населения при воздействии радионуклида r[7], мЗв/кБк;

V- интенсивность дыхания предс тавителей групп населения, м $^3/$ ч.

При легкой физической нагрузке средняя интенсивность дыхания принимается равной для взрослого населения  $1,4\,\mathrm{m}^3/\mathrm{u}$ , для детей школьного возраста —  $1,1\,\mathrm{m}^3/\mathrm{u}$ , для дошкольников —  $0,35\,\mathrm{m}^3/\mathrm{u}$ . Следует отметить, что при тяжелой работе интенсивность дыхания увеличивается в среднем в 2 раза, а при очень тяжелой до  $4-5\,\mathrm{pas}$ .

Доза  $E_2^{\text{прод}}$  внутреннего облучения населения за счет поступления радионуклидов в организм с продуктами питания и водой определяется в соответствии с методами, изложенными в [6].

Суммарная доза облучения. Дозовая нагрузка за заданный промежуток времени у представителей определенных групп населения, проживающих на территории, подвергшейся загрязнению PB, может быть найдена суммированием четырех компонентов — дозы внешнего облучения от



радиоактивного облака и загрязнения местности и дозы внутреннего облучения за счет ингаляции радионуклидов и их поступления в организм с продуктами питания и водой. Следует отметить, что эти вычисления проводят для каждой из площадок с координатами (x, y):

$$D(x,y) = E_1^{\text{обл}}(x,y) + E_1^{\text{пов}}(x,y) + E_2^{\text{инг}}(x,y) + E_2^{\text{прод}}(x,y).$$
(6)

# Радиационные эффекты

В настоящее время, несмотря на имеющиеся данные о погибших после атомных бомбардировок и в результате аварий на АЭС, однозначная зависимость между вероятностью летального исхода и радиационной дозой не установлена. В таблице 3 указаны вероятности летального исхода от воздействия ионизирующего излучения на человека для ряда доз облучения [8].

Вероятность P[D(x, y)] смертельного поражения людей в точке (x, y) при однократном радиационном облучении на ранней фазе аварии определяется по таблице 3 в зависимости от значения суммарной дозы облучения, рассчитанной по формуле (6).

**Таблица 3.** Вероятность летального исхода при радиационном поражении **Table 3.** Probability of fatal outcome due to radiological damage

Доза, Зв	Вероятность, %	Радиационные эффекты при кратковременном облучении
1	0	Нижний уровень развития легкой степени лучевой болезни
1–2	2	Острая лучевая болезнь
2–4	30	Тяжелая степень лучевой болезни
4–5	50	« с летальным исходом в течение 60 дней
5–10	95	«« 14 дней
Более 10	100	«« 2 дней



# Оценка риска на радиационно опасных объектах

При заблаговременном прогнозировании вероятное число пострадавших при ранней фазе аварии на РОО можно оценить по формуле

$$M(N) = \iint_{S} \int_{0}^{2\pi} \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} P[D(x,y)] f(\alpha,v) \psi(x,y) dv d\alpha dx dy, \qquad (7)$$

где P[D(x, y)] — вероятность поражения людей при воздействии дозы радиоактивного излучения в точке с координатами (x, y);

 $f(\alpha, v)$  — функция плотности распределения направления  $\alpha$  и скорости ветра v;

 $\psi(x, y)$  — плотность размещения незащищенного персонала объекта (населения) с учетом времени пребывания в пределах элементарной площадки;

S — площадь РОО (территории), где возможно поражение людей при аварии.

При определении вероятности P[D(x, y)] поражения людей необходимо учитывать основные пути проникновения радионуклидов в организм человека и зависящий от них характер облучения.

При оценке ожидаемого числа пострадавших по факту аварии направление и скорость ветра принимаются по фактическому событию.

При анализе риска рассматривается каждый из путей радиационного воздействия на организм человека, определяется его роль в формировании радиационного риска. Кроме того, оценка риска проводится с учетом групп населения, подвергающихся наибольшему радиационному воздействию по тому или иному пути облучения [6].

Потенциальный территориальный риск поражения людей в заданной точке рассматриваемой территории для ранней фазы аварии на РОО определяется с учетом различной скорости и повторяемости ветра по направлениям:



$$R_{\Pi}(x,y) = \lambda \int_{0}^{2\pi} \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} P[D(x,y)] f(\alpha,v) dv d\alpha, \qquad (8)$$

здесь  $\lambda$  – частота аварий на POO за год.

Зонирование территории проводят путем соединения точек с равными значениями потенциального территориального риска, которые характеризуются возможной дозой излучения. Это позволяет установить границы территорий, имеющих различную степень опасности для здоровья и жизни людей [1,9,10].

Коллективный и индивидуальный риски поражения людей при аварии на РОО определяются с учетом математического ожидания потерь (7) по формулам

$$R_{\text{\tiny KOJI}} = \lambda M(N); \quad R_{\text{\tiny MHJ}} = R_{\text{\tiny KOJI}} / N_0,$$
 (8)

где  $N_0$  — численность людей в зоне риска. Частота  $\lambda$  возникновения аварии принимается по статистическим или проектным данным.

Риски для средней и поздней фаз аварии определяют в соответствии методическими указаниями, приведенными в [6].

#### Выводы

На основе приведенного в статье методического подхода в МГТУ им. Н.Э. Баумана разработаны программные средства по моделированию полей опасности и анализу риска при авариях на радиационно опасных объектах с выбросом (угрозой выброса) радиоактивных веществ с учетом метеоусловий и закономерностей формирования радиационной обстановки на ранней фазе радиационной аварии.

Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-11-2019-087 от 18.12.2019).



#### Список источников

- 1. Александров А.А., Ларионов В.И., Сущев С.П. Анализ и управление техногенными и природными рисками. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. 357 с.
- 2. ИНЕС. Руководство для пользователей международной шкалы ядерных и радиологических событий. Вена: Издательская секция МАГАТЭ, 2010. 250 с.
- 3. РД 52.18.717-2009. Методика расчета рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере при аварийных выбросах. Обнинск: ПРИНТ-СЕРВИС, 2009. 121 с.
- 4. Горбунов С.В. Формирования зон радиоактивного загрязнения при авариях на ядерных энергетических установках. Химки: АГЗ МЧС России, 2008. 138 с.
- 5. Методические указания по расчету радиационной обстановки в окружающей среде и ожидаемого облучения населения при кратковременных выбросах радиоактивных веществ в атмосферу МПА-98. М.: Минатом РФ, 1998. 20 с.
- 6. МУ 2.6.1.2153-06. Оперативная оценка доз облучения населения при радиоактивном загрязнении территории воздушным путем. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2007. 55 с.
- 7. Гигиенические нормативы // СП 2.6.1.758-99. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99). М.: Центр нормирования и сертификации Минздрава России, 1999. С. 79-95.
- 8. Источники, эффекты и опасность ионизирующей радиации: доклад Научного комитета ООН по действию атомной радиации Генеральной Ассамблее за 1988 г., с приложениями: В 2 Т. / Пер. с англ. А.В. Зайцева, В.М. Кулакова, Л.А. Сердюковой / Под ред. В.М. Кулакова, Л.М. Рождественского. М.: Мир, 1992. Т. 1. 552 с.



- 9. Фалеев М.И., Малышев В.П., Быков А.А., Кондратьев-Фирсов В.М. Методологические подходы к зонированию территорий Российской Федерации по уровням риска чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. 2015. Т. 5. № 1 (8). С. 67-90.
- 10. Методика комплексной оценки индивидуального риска чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера // Сборник методических документов, применяемых для независимой оценки рисков в области пожарной безопасности, гражданской обороны и защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций: В 2 Ч. М.: Типография Полимаг, 2008. Ч. 1. С. 158-159.

#### References

- 1. Aleksandrov A.A., Larionov V.I., Sushchev S.P. *Analiz i upravlenie tekhnogennymi i prirodnymi riskami* [Analysis and Management of Man-Made and Natural Risks]. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana Publ, 2019. 357 p. [in Russian].
- 2. *INES. Rukovodstvo dlya pol'zovatelei mezhdunarodnoi shkaly yadernykh i radiologicheskikh sobytii* [INES. A User's Guide to the International Nuclear and Radiological Event Scale]. Vienna, Izdatel'skaya sektsiya MAGATE Publ., 2010. 250 p. [in Russian].
- 3. *RD* 52.18.717-2009. *Metodika rascheta rasseyaniya zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosfere pri avariinykh vybrosakh* [RD 52.18.717-2009. Methodology for Calculating the Dispersion of Pollutants in the Atmosphere during Accidental Emissions]. Obninsk, PRINT-SERVIS Publ., 2009. 121 p. [in Russian].
- 4. Gorbunov S.V. Formirovaniya zon radioaktivnogo zagryazneniya pri avariyakh na yadernykh energeticheskikh ustanovkakh [Formation of Radioactive Contamination Zones in Accidents at Nuclear Power Plants]. Khimki, AGZ MChS Rossii Publ., 2008. 138 p. [in Russian].



- 5. 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]. Moscow, Minatom RF Publ., 1998. 20 p. [in Russian].
- 6. MU 2.6.1.2153-06. Operativnaya otsenka doz oblucheniya naseleniya pri radioaktivnom zagryaznenii territorii vozdushnym putem [MU 2.6.1.2153-06. Efficient Estimation of People Exposure by Aerial Way Radioactive Contamination of Territory]. Moscow, Federal'nyi tsentr gigieny i epidemiologii Rospotrebnadzora Publ., 2007. 55 p. [in Russian].
- 7. Gigienicheskie normativy [Hygiene Standards]. *SP 2.6.1.758-99. Normy radiatsionnoi bezopasnosti (NRB-99)* [SP 2.6.1.758-99. Radiation Safety Standards (NRB-99)]. Moscow, Tsentr normirovaniya i sertifikatsii Minzdrava Rossii Publ., 1999. pp. 79-95. [in Russian].
- 8. Istochniki, effekty i opasnost' ioniziruyushchei radiatsii: doklad Nauchnogo komiteta OON po deistviyu atomnoi radiatsii General'noi Assamblee za 1988 g., s prilozheniyami: V 2 T. [Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation: Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly for 1988, with Annexes: In 2 Volumes]. Translation from English by A.V. Zaitseva, V.M. Kulakova, L.A. Serdyukovoi. Ed. by V.M. Kulakova, L.M. Rozhdestvenskogo. Moscow, Mir Publ., 1992, Vol. 1. 552 s. [in Russian].
- 9. Faleev M.I., Malyshev V.P., Bykov A.A., Kondratev-Firsov V.M. Metodologicheskie podkhody k zonirovaniyu territorii Rossiiskoi Federatsii po urovnyam riska chrezvychainykh situatsii prirodnogo i tekhnogennogo kharaktera [Methodological Approaches to the Zoning of the Territories of the Russian Federation According to the Risk Levels of Natural and Man-Made Emergencies]. *Strategiya grazhdanskoi zashchity: problemy i issledovaniya Civil Protection Strategy: Issues and Research*, 2015, Vol. 5, No. 1 (8), pp. 67-90. [in Russian].



10. Metodika kompleksnoi otsenki individual'nogo riska chrezvychainykh situatsii prirodnogo i tekhnogennogo kharaktera [Methodology for a Comprehensive Assessment of the Individual Risk of Natural and Man-Made Emergencies]. Sbornik metodicheskikh dokumentov, primenyaemykh dlya nezavisimoi otsenki riskov v oblasti pozharnoi bezopasnosti, grazhdanskoi oborony i zashchity naseleniya i territorii ot chrezvychainykh situatsii: V 2 Ch. [A Collection of Methodological Documents Used for an Independent Risk Assessment in the Field of Fire Safety, Civil Defense and Protection of the Population and Territories from Emergencies: In 2 Parts]. Moscow, Tipografiya Polimag Publ., 2008, Part 1, pp. 158-159. [in Russian].

# Сведения об авторах

#### **About the Authors**

Ларионов Валерий Иванович, д-р техн. наук, профессор, заместитель директора Научно-образовательного центра исследований экстремальных ситуаций, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Valeriy I. Larionov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Deputy Director of the Scientific and Educational Center for Study of Extreme Situations, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

e-mail: lar@esrc.ru

Александров Анатолий Александрович, д-р техн. наук, профессор, президент, заведующий кафедрой «Экология и промышленная безопасность», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Aleksandrov Anatoliy A., Doctor of Engineering Sciences, Professor, President, Head of Ecology and Industrial Safety Department, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

e-mail: bauman@bmstu.ru



Сущев Сергей Петрович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Экология и промышленная безопасность», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Sushchev Sergey P., Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of Ecology and Industrial Safety Department, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

e-mail: esrc@esrc.ru