

УДК 502.53:504.055:504.064
<https://doi.org/10.32686/1812-5220-2023-20-3-10-26>

ISSN 1812-5220
© Проблемы анализа риска, 2023

Оценка экологического риска от радиоактивного загрязнения окружающей среды

Крышев И.И.,
Павлова Н.Н. *,
Сазыкина Т.Г.,
Крышев А.И.,
Косых И.В.,
Бурякова А.А.,
Росновская Н.А.,

Научно-производственное объединение «Тайфун»,
249038, Россия, Калужская область, г. Обнинск,
ул. Победы, д. 4

Аннотация

В статье представлена методология оценки риска от радиоактивного загрязнения окружающей среды по данным мониторинга радиационной обстановки на основе показателей радиационного фона и контрольных уровней содержания радионуклидов в компонентах природной среды, не превышение которых обеспечивает сохранение благоприятной окружающей среды. В методологии оценки риска используются три показателя: индекс экологического риска, рассчитываемый по мощности дозы облучения референтных организмов биоты; интегральный показатель загрязнения территории; обобщенный показатель риска, оцениваемый в баллах с учетом интенсивности радиационного воздействия, площади и временной динамики загрязнения. Приведены примеры апробации методологии оценки экологического риска на загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС территориях и в районах расположения радиационно опасных объектов. Предложенный порядок оценки экологического риска может быть использован для анализа и интерпретации информации о радиационных рисках на территории Российской Федерации по данным мониторинга радиационной обстановки с учетом требований в области охраны окружающей среды, оценки состояния и изменений радиационной обстановки под воздействием природных и антропогенных факторов, в т. ч. в районах расположения радиационных объектов, получения достоверной информации об интегральном уровне радиационного воздействия на окружающую среду и ее интерпретации на основе концепции экологического риска.

Результаты оценки риска от радиоактивного загрязнения окружающей среды могут использоваться при выработке и принятии решения о необходимости проведения природоохранных мероприятий, а также позволяют выполнить ранжирование факторов радиационного воздействия и рационально организовать мониторинг радиационной обстановки.

Ключевые слова: экологический риск; радионуклиды; радиационно опасный объект; мониторинг радиационной обстановки; контрольный уровень; интегральный показатель загрязнения; обобщенный показатель риска.

Для цитирования: Крышев И.И., Павлова Н.Н., Сазыкина Т.Г. и др. Оценка экологического риска от радиоактивного загрязнения окружающей среды // Проблемы анализа риска. 2023. Т. 20. № 3. С. 10—26, <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2023-20-3-10-26>

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Assessment of Environmental Risk from Radioactive Pollution of the Environment

Ivan I. Kryshev,
Nadezhda N. Pavlova*,
Tatyana G. Sazykina,
Alexander I. Kryshev,
Irina V. Kosykh,
Anna A. Buryakova,
Nelly A. Rosnovskaya,
Research and Production
Association "Typhoon",
Pobedy str., 4, Obninsk,
Kaluga region, 249038, Russia

Abstract

The article presents a methodology for assessing the risk of radioactive contamination of the environment according to the data of radiation monitoring. The methodology is based on the indicators of radiation exposure and control levels of radionuclides in environmental components, the non-exceeding of which ensures the safety of natural environment. The risk assessment methodology uses three indicators: an environmental risk index, based on radiation dose rates to reference biota; an integral indicator of pollution of the territory; a generalized risk indicator, estimated in scores, considering both the area and time dynamics of pollution. Examples of methodology application are given, presenting risk assessment for Chernobyl contaminated territories, also risk assessment for radiation hazardous facilities. The proposed risk assessment procedure can be used to analyzing and interpreting information about radiation risks on the territory of the Russian Federation based on radiation monitoring data, taking into account the requirements of environmental protection, assessment of the state and changes in the radiation situation under the influence of natural and anthropogenic factors, including radiation facilities. The methodology produces reliable integral information about radiation impact on the environment and its interpretation based on the concept of environmental risk.

The results of the risk assessment from radioactive pollution of the environment are used in the development and decision-making on the need for environmental protection measures, and also make it possible to rank the factors of radiation exposure and rationally organize monitoring of the radiation situation.

Keywords: environmental risk; radionuclides; radiation hazardous object; monitoring of radiation situation; control level; integral pollution indicator; generalized risk indicator.

For citation: Kryshev I.I., Pavlova N.N., Sazykina T.G. et al. Assessment of environmental risk from radioactive pollution of the environment // *Issues of Risk Analysis*. 2023;20(3):10-26, (In Russ.), <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2023-20-3-10-26>

The authors declare no conflict of interest.

Содержание

Введение

1. Методология анализа радиационного риска
2. Показатели оценки радиационного экологического риска
3. Порядок оценки обобщенного показателя риска

Заключение

Литература

Введение

Одной из основных целей системы мониторинга загрязнения окружающей среды техногенными радионуклидами являются своевременное выявление изменений радиационной обстановки, оценка, прогнозирование и предупреждение возможных негативных последствий радиационного воздействия для окружающей среды.

В соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 10 июля 2014 г. № 639¹ оценки и прогноз экологических рисков, обусловленных радиоактивным загрязнением окружающей среды, являются важным принципом функционирования системы мониторинга и ее функциональных подсистем.

Интегральным показателем состояния радиационной обстановки является риск от радиоактивного загрязнения окружающей среды. В современных международных основных нормах безопасности [1], являющихся базовым документом для обновления и переработки национальных норм радиационной безопасности, сформулирован принцип защиты нынешних и будущих поколений и окружающей среды от радиационных рисков, а также выдвинуто требование о необходимости подтверждения (а не гипотетического предположения) о защите окружающей среды от воздействия радиоактивного загрязнения.

Основным достоинством предложенной методологии оценки риска является переход от множества натуральных и расчетных данных к интегральным показателям, позволяющим сравнивать опасность различных составляющих загрязнения окружающей среды, оптимизировать принятие практических решений в области охраны окружающей среды и планирования природоохранных мероприятий в районах размещения радиационно опасных объектов.

1. Методология анализа радиационного риска

Методология анализа риска, обусловленного радиоактивным загрязнением окружающей среды, основана на следующих принципах [2, 3]:

- интегральность оценки — методология анализа риска является современным средством интегральной оценки качества окружающей среды;
- системность — анализируются множественные пути радиационного воздействия на природные объекты и человека;
- надежность (консервативность) — в качестве входных используются обобщенные данные радиационного мониторинга, недостающие параметры измеряются дополнительно или оцениваются с помощью радиоэкологических моделей, не допускающих занижение оценки риска;
- практическая значимость — результаты анализа риска используются для обоснования принятия решений в области радиационно-экологической безопасности.

Анализ радиационного риска включает в себя следующие этапы [3]: идентификация источников риска, анализ данных радиационного мониторинга и модельных оценок переноса радионуклидов в окружающей среде, оценка радиационного риска, категоризация (характеристика) риска, представление результатов анализа для управления риском. Функциональная схема анализа риска представлена на рис. 1 [2].

Консервативно предполагается, что потенциально все радионуклиды, поступающие в окружающую среду, могут быть источниками риска. В соответствии с принципом системности первоначально рассматриваются все возможные пути радиационного воздействия: поступление радионуклидов в атмосферу, водные объекты, почву и биоту в результате выбросов и сбросов, радиоактивное загрязнение территорий в результате предшествующей деятельности объектов, в том числе в результате радиационных аварий и инцидентов, возможность радиационного воздействия вследствие трансграничного переноса радионуклидов.

На последующем этапе подготавливаются обобщенные данные для оценки риска. Анализируются и обобщаются данные мониторинга Росгидромета и других организаций о содержании радионукли-

¹ Постановление Правительства Российской Федерации от 10 июля 2014 г. № 639 «О государственном мониторинге радиационной обстановки на территории Российской Федерации» (ред. от 23.03.2021 и 18.01.2022).

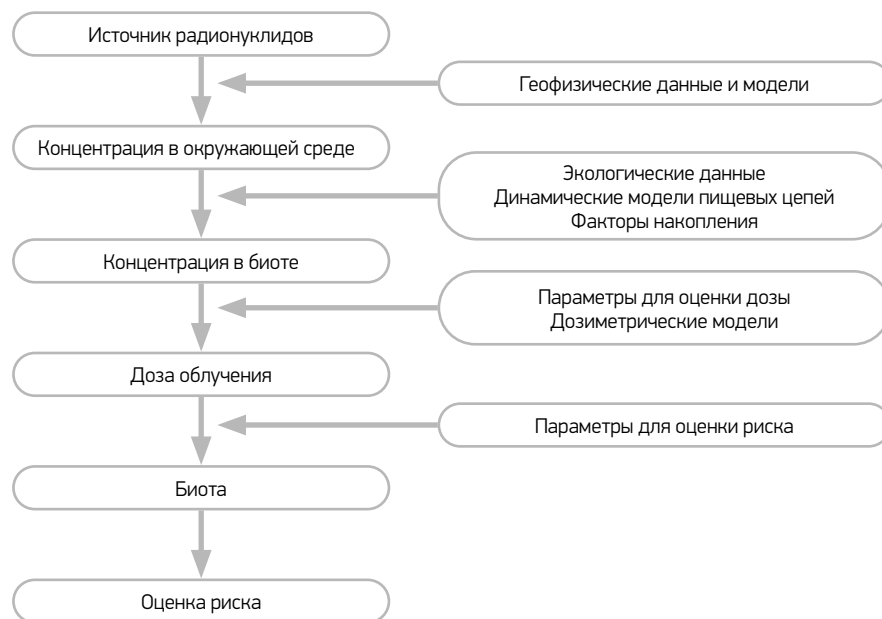


Рис. 1. Схема анализа радиационно-экологического риска

Figure 1. Scheme of radiation and environmental risk analysis

дов в атмосфере, почве, воде и биоте на изучаемой территории. Выполняются статистические оценки содержания радионуклидов в компонентах природной среды, которые в дальнейшем используются для анализа радиационного риска.

Для недостающих значений входных параметров выполняются оценки при помощи консервативных моделей, которые в соответствии с принципом надежности не должны занижать последующих оценок риска. В случае необходимости проводится дополнительное радиоэкологическое обследование территории.

На этапе оценки риска определяются возможные пути и продолжительность радиационного воздействия. Оцениваются значения параметров моделей анализа радиационного риска. Выполняются расчеты риска с учетом множественных путей радиационного воздействия.

На этапе категоризации риска производится интерпретация полученных результатов, включая выявление ограничений и неопределенностей используемых моделей и данных. Сравнение оцененных рисков с другими существенными (релевантными) рисками на рассматриваемой территории, включая риски от естественного радиационного фона, также составляет часть категоризации риска.

Результаты оценки риска используют при разработке и принятии решения о степени снижения или необходимости ограничения риска. Приемлемый риск может выражаться через производные параметры, такие как допустимая удельная активность радионуклидов в компонентах природной среды. В процессе управления наряду с оцененным риском могут учитываться экологические, экономические и социальные факторы.

Управление риском осуществляется с помощью основных принципов обеспечения радиационной безопасности: нормирования, обоснования и оптимизации².

Расчетная оценка радиационного риска выполняется на основе обобщенных данных радиоэкологического мониторинга компонентов природной среды. В соответствии с принципом системности — необходимости учета множественных путей радиационного воздействия рассматривается каждый из них и оценивается его роль в формировании риска.

При определении ориентировочных уровней риска на начальном этапе анализа во избежание

² Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. М., 2009. 67 с.

занижения степени радиационной опасности, как правило, следует ориентироваться на оценку разумно обоснованного максимального воздействия. В качестве меры удельной концентрации радионуклида в компоненте природной среды в этом случае рекомендуется использовать 95%-ную верхнюю доверительную границу среднего значения за период усреднения (обычно за год), или 95-й процентиль при неизвестном типе статистического распределения. В качестве фоновой удельной активности радионуклида в компоненте природной среды принимается его статистически достоверное максимальное содержание на фоновом участке, которое не превышает в 5% случаев [4].

Средняя удельная активность радионуклида в компонентах природной среды в зоне наблюдений (или 50-й процентиль при неизвестном типе статистического распределения) применяется в тех случаях, когда целью анализа является оценка главной тенденции. При отсутствии или недостаточности данных о содержании радионуклидов в компонентах природной среды выполняются модельные оценки с помощью радиоэкологических моделей.

При одновременном наличии в окружающей среде нескольких радионуклидов риск рассчитывается сначала для каждого исследуемого радионуклида, затем для смеси в целом. В случае недостаточности данных может оцениваться риск как по отдельным путям воздействия, так и суммарный, на основе анализа сценариев множественных путей радиационного воздействия.

Сценарий воздействия составляется исходя из целей оценки риска, результатов радиационного мониторинга, концептуальной модели исследуемой территории и представляет собой совокупность фактов, допущений и экспертных заключений о том, каким образом происходит воздействие. Он включает в себя облучаемые контингенты природных объектов и населения, условия и пути радиационного воздействия. Наиболее консервативные сценарии, позволяющие провести ориентировочную оценку риска с использованием данных мониторинга и консервативных модельных оценок распределения радионуклидов в компонентах природной среды, рекомендуется использовать на начальном этапе идентификации источников риска.

Неопределенности в оценках риска зависят от неопределенности данных мониторинга и модельных оценок. Наибольшие неопределенности характерны для консервативных моделей, использующих в качестве входных данных информацию об источнике радиоактивного выброса или сброса. Такие модели, как правило, описывают перенос радионуклидов в компонентах природной среды со значительной неопределенностью. Использование непосредственно данных мониторинга позволяет существенно уменьшить неопределенность оценки радиационного риска.

Результаты оценки риска используются для сравнительной оценки воздействия различных факторов окружающей среды на разных территориях, в разные временные периоды, в том числе для оценки долговременного радиационного воздействия пунктов размещения и консервации особых РАО на окружающую среду.

В качестве основного экологического критерия радиационного риска принимается максимально допустимая мощность дозы, не приводящая к воздействию на заболеваемость, размножение и продолжительность жизни организмов биоты, — предельно допустимая радиационная нагрузка (ПДРН): 1 мГр/сут для млекопитающих, позвоночных животных и сосны обыкновенной *Pinus sylvestris*, 10 мГр/сут для растений, кроме сосны, и беспозвоночных животных [5, 6].

В соответствии с постулатом порогового действия ионизирующего излучения на объекты живой природы при непревышении ПДРН сохраняются живучесть популяций и видовое разнообразие, являющееся одним из важных интегральных параметров биотического сообщества как в естественном состоянии, так и в условиях антропогенного воздействия. Данный параметр характеризуется высокой социальной и экологической значимостью, чувствительностью к источнику радиационного воздействия и является, по существу, синонимом качества окружающей среды.

В качестве дополнительного критерия содержание радионуклидов в компонентах природной среды ограничивается уровнями, при которых происходит их переход в категорию радиоактивных отходов.

2. Показатели оценки радиационного экологического риска

Для оценки радиоэкологической обстановки используются следующие показатели радиационного экологического риска:

- индекс экологического риска — отношение мощности дозы облучения представительных организмов к ПДРН (безразмерный);
- интегральный показатель загрязнения природной среды (почва, вода, донные отложения, атмосферный воздух), представляющий собой сумму отношений содержания радионуклидов в природной среде к их контрольным уровням, рассчитанным на основе указанных критериев в соответствии с рекомендациями [7—11];
- обобщенный показатель риска в исследуемом районе с учетом пространственного масштаба, продолжительности и интенсивности радиационного воздействия [12—14].

Индекс экологического риска рассчитывается по формуле

$$\text{ИЭР} = \frac{D_i}{\text{ПДРН}_i}, \quad (1)$$

где D_i — мощность дозы облучения i -го референтного организма, мГр/сут, определяемая в соответствии с [5, 6, 15]; ПДРН $_i$ — предельно допустимая радиационная нагрузка для i -го референтного организма, мГр/сут.

В качестве референтных выбираются следующие организмы [6]: почвенные беспозвоночные, наземные млекопитающие, травянистая растительность, деревья, птицы, земноводные, макроводоросли, рыба (пелагическая и придонная), бентос, водные млекопитающие. Для консервативной оценки в качестве показателя экологического риска выбирается максимальный из рассчитанных ИЭР.

Представленный метод оценки риска от радиационного загрязнения компонентов природной среды апробирован для широкого круга объектов. В качестве примера рассмотрим Ольховское болото, в которое через искусственный канал на протяжении всего периода работы Белоярской АЭС осуществляется штатный сброс радиоактивных веществ. Ольховское болото задерживает радионуклиды и уменьшает их попадание в р. Пышму. Тер-

ритория Ольховского болота включена в санитарно-защитную зону Белоярской АЭС, ее хозяйственное или рекреационное использование населением исключено. Ольховское болото с вытекающей из него р. Ольховкой является единственным участком в районе расположения Белоярской АЭС, в котором превышены фоновые значения в поверхностной воде, Бк/л: $1,1 \cdot 10^{-2}$ для ^{137}Cs , $1,6 \cdot 10^{-2}$ — ^{90}Sr . Суммарная активность ^{137}Cs и ^{60}Co в донных отложениях оценивается 0,2 ТБк и 2,4 ГБк соответственно [16, 17].

Динамика мощности дозы облучения представительных видов Ольховской болотно-речной экосистемы в 2000—2020 гг. показана на рис. 2. Наибольшая за рассмотренный период времени мощность дозы облучения отмечалась в 2004 г. Для представительных организмов она достигала следующих значений, мГр/сут: 0,025 — бобр, 0,019 — тростник, 0,017 — лягушка, 0,016 — утка, 0,015 — прудовик, 0,012 — ива козья. Вклад внутреннего облучения в мощность дозы составляет, %: 59 — бобр, 28 — ива козья, 21 — утка, 20 — тростник, 14 — лягушка, 0,1 — прудовик.

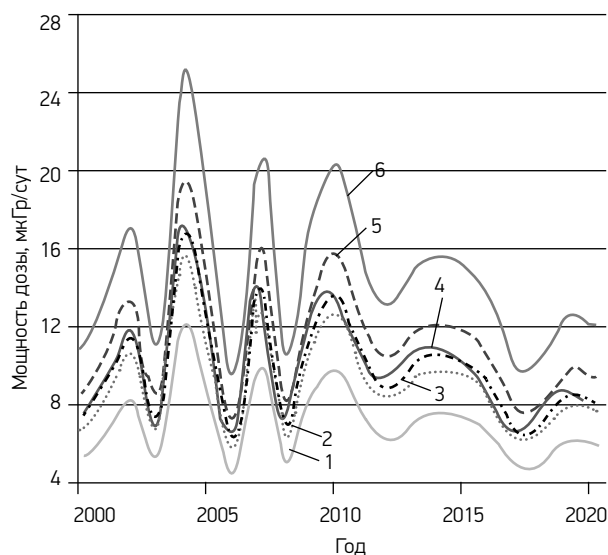


Рис. 2. Мощность дозы облучения представительных организмов Ольховской болотно-речной экосистемы: 1 — ива козья; 2 — прудовик; 3 — утка; 4 — лягушка; 5 — тростник; 6 — бобр

Figure 2. Radiation dose rate of representative organisms of the Olkhovskaya swamp-river ecosystem: 1 — goat willow; 2 — pond; 3 — duck; 4 — frog; 5 — reed; 6 — beaver

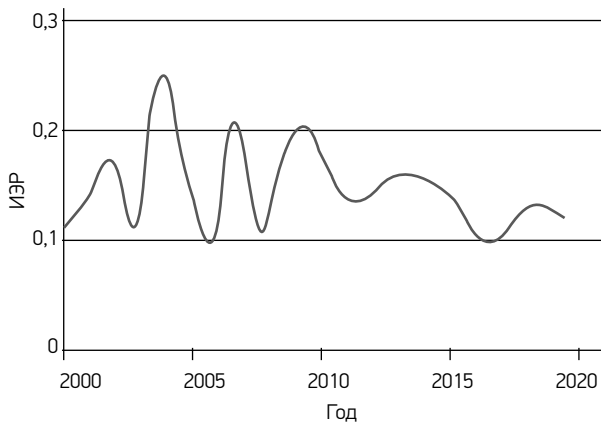


Рис. 3. Динамика индекса экологического риска для наземного млекопитающего (бобра) Ольховской болотно-речной экосистемы

Figure 3. The dynamics of the radiation risk index for a terrestrial mammal (beaver) of the Olkhovskaya swamp-river ecosystem

Наиболее высокий показатель риска из всех представительных организмов экосистемы (0,1–0,25) оценен для наземного млекопитающего бобра (см. рис. 3). Это обусловлено как наиболее высокой мощностью дозы облучения ¹³⁷Cs по сравнению с другими представительными организма-

ми, так и наиболее низким допустимым уровнем мощности дозы для млекопитающих (см. рис. 2). Максимальный показатель риска для других представительных организмов отмечался в 2004 г., составляя, 10⁻²: 1,7 для лягушки, 1,6 — утки, 0,15 — прудовика, 0,19 — тростника, 0,12 — ивы козья. В 2020 г. показатель риска варьировал в диапазоне от 5,8 · 10⁻⁴ (ива козья) до 1,2 · 10⁻¹ (бобр). На протяжении всего периода времени 2000—2020 гг. показатель риска для биоты Ольховской болотно-речной экосистемы оставался ниже единицы, что позволяет предположить отсутствие детерминированных радиобиологических эффектов, обусловленных радиоактивным загрязнением донных отложений [16].

Интегральный показатель загрязнения радионуклидами рассчитывается по формуле

$$ИПЗ = \sum_i \frac{A_i}{A_{k_i}}, \quad (2)$$

где A_i — удельная активность i -го радионуклида в воде, донных отложениях, почве, Бк/кг сырой массы, атмосферном воздухе, Бк/м³; A_{k_i} — контрольный уровень удельной активности i -го радионуклида с учетом экологического и радиационного

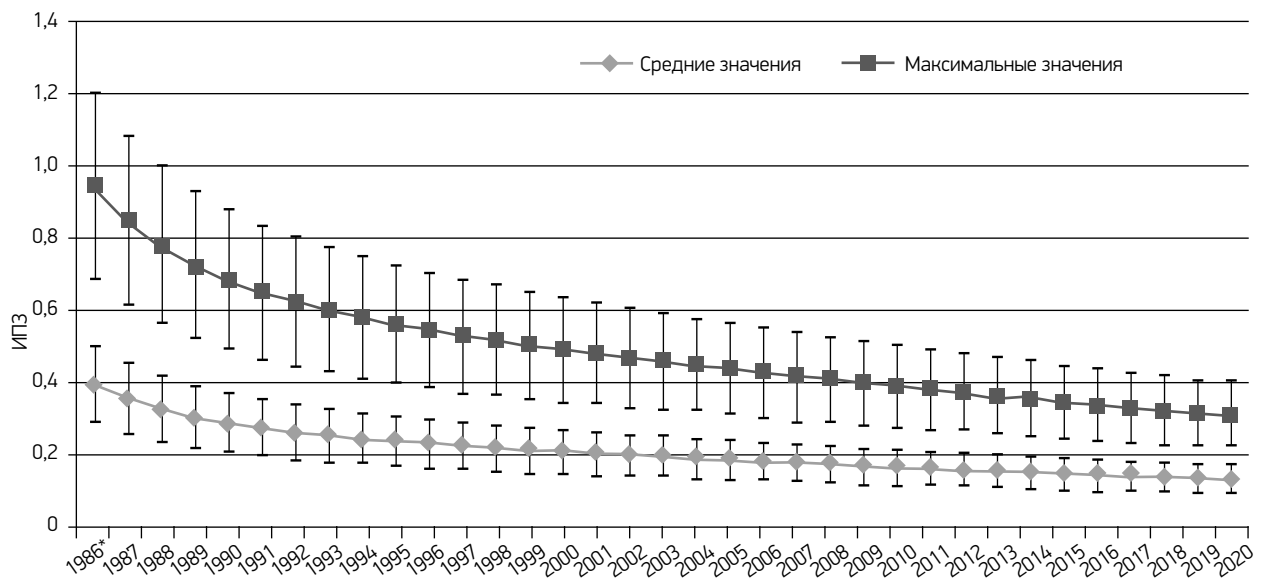


Рис. 4. Средние и максимальные значения ИПЗ для загрязненных участков в окрестностях населенных пунктов Гордеевского района Брянской области в динамике 1986—2020 гг. (*в 1986 г. данные за май — декабрь)

Figure 4. Average and maximum values of ERI for polluted sites in the vicinity of settlements of the Gordeyevsky district of the Bryansk region in the dynamics of 1986—2020 (in 1986, data for May — December)

Таблица 1. Оценка интегрального показателя загрязнения на территории аварийного чернобыльского следа в России (по данным на 2020 г.)*Table 1. Assessment of the integral indicator of pollution on the territory of the Chernobyl accident trail in Russia (according to data for 2020)*

Область/Район	ИПЗ (средний)	ИПЗ (максимальный)	Вклад в ИПЗ ¹³⁷ Cs, %
Брянская			
Гордеевский	0,13 ± 0,02	0,32 ± 0,04 (1,9)	96
Злынковский	0,17 ± 0,03	0,45 ± 0,09 (1,3)	92
Клинцовский	0,08 ± 0,02	0,22 ± 0,04 (0,87)	95
Красногорский	0,12 ± 0,04	0,27 ± 0,05 (2,9)	92
Новозыбковский	0,18 ± 0,02	0,45 ± 0,10 (2,1)	96
Дубровский	0,0027 ± 0,0006	0,005 ± 0,001	91
Калужская			
Жиздринский	0,031 ± 0,006	0,065 ± 0,012 (0,20)	86
Ульяновский	0,049 ± 0,005	0,086 ± 0,009 (0,28)	93
Хвастовичский	0,024 ± 0,006	0,072 ± 0,017 (0,21)	89
Боровский	0,0014 ± 0,0005	0,0023 ± 0,0007	80
Тульская			
Арсеньевский	0,048 ± 0,003	0,085 ± 0,005 (0,25)	92
Белевский	0,024 ± 0,005	0,051 ± 0,009 (0,35)	84
Плавский	0,054 ± 0,009	0,11 ± 0,04 (0,53)	89
Заокский	0,0021 ± 0,0004	0,0054 ± 0,0019	90
Орловская			
Болховский	0,034 ± 0,003	0,052 ± 0,005 (0,16)	77
Урицкий	0,015 ± 0,002	0,026 ± 0,004 (0,09)	95
Новгородская	0,0042 ± 0,0006	0,0075 ± 0,0015	94

Примечание. В скобках максимальные значения ИПЗ на локальных наиболее загрязненных участках.

критериев. При ИПЗ < 1 выполняется условие сохранения благоприятной окружающей среды.

В целях оценки качества окружающей среды по уровню активности радионуклидов на территории аварийного чернобыльского следа были рассчитаны средние и максимальные значения ИПЗ (рис. 4, табл. 1) [18].

Согласно расчетным оценкам, многолетняя динамика изменений ИПЗ характеризуется постепенным снижением, в основном обусловленным процессами радиоактивного распада чернобыльских радионуклидов. Максимальные уровни ИПЗ имели

место в мае — декабре 1986 г. Наблюдается существенная неоднородность в распределении ИПЗ по территории аварийного следа для различных областей, а также в пределах одной области. Наиболее высокие значения ИПЗ отмечаются на территории Гордеевского, Злынковского, Клинцовского, Красногорского и Новозыбковского районов Брянской области. Значения ИПЗ в этих районах в среднем в 30—70 раз выше, чем в малозагрязненном Дубровском районе этой же области. В настоящее время значения ИПЗ на территории этих пяти районов в 2—12 раз ниже [18].

В отличие от Брянской области для других областей на территории аварийного чернобыльского следа не наблюдается превышение ПДРН даже на максимально загрязненных участках. В Калужской и Тульской областях значения ИПЗ в наиболее загрязненных районах в 10–40 раз ниже безопасного уровня, а в малозагрязненных районах — в 200–700 раз. Вклад ¹³⁷Cs в ИПЗ — 80–93%. В Орловской области значения ИПЗ в загрязненных районах в 20–70 раз ниже ПДРН, вклад ¹³⁷Cs в ИПЗ — 77–95%. В малозагрязненной Новгородской области ИПЗ в 100–200 раз ниже безопасного для биоты уровня [18].

Результаты расчетов интегральных показателей загрязнения техногенными радионуклидами воды и донных отложений Карского моря представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что все значения ИПЗ меньше 1. Показатель загрязнения воды радионуклидами в период с 1992 по 1996 г. составил $8,56 \cdot 10^{-4}$, в 2004–2012 гг. это значение снизилось в 3 раза и составило $2,68 \cdot 10^{-4}$. Показатель загрязнения донных отложений в 1992–1996 гг. составил $1,40 \cdot 10^{-3}$, а в 2004–2012 гг. уменьшился в 1,5 раза. Относительные вклады радионуклидов в индекс загрязнения воды и донных отложений Карского моря в рассмотренные периоды времени находились примерно на одном уровне [19].

Наряду с расчетом интегрального показателя на загрязненных участках оцениваются фоновые

значения, по данным мониторинга, на контрольном участке за пределами зон влияния радиационных объектов, вне зон воздействия радиационных аварий, повышенных выбросов и сбросов радиоактивных веществ в соответствии с рекомендациями [4].

В целях интегральной оценки радиоэкологической обстановки радиационное воздействие на природные объекты масштабируется с учетом рекомендаций [4, 5]:

- недопустимое воздействие, при котором доза облучения представительных организмов превышает безопасный уровень (индекс экологического риска больше или равен 1), или интегральный показатель загрязнения больше или равен 1;
- экологически приемлемое воздействие, при котором доза облучения представительных организмов не менее чем в 10 раз ниже ПДРН (индекс экологического риска меньше 0,1), или интегральный показатель загрязнения меньше 0,1;
- фоновое воздействие, при котором доза облучения представительных организмов значимо не отличается от радиационного фона.

Результаты оценки радиоэкологической обстановки используются при выработке и принятии решения о проведении природоохранных мероприятий. При радиационном воздействии ниже экологически приемлемого не требуются природоохранные мероприятия для обеспечения радиационной

Таблица 2. Значения интегральных показателей загрязнения воды и донных отложений Карского моря техногенными радионуклидами

Table 2. Values of integral indicators of pollution of water and bottom sediments of the Kara Sea by technogenic radionuclides

Компонент	1992—1996 гг.		2004—2012 гг.	
	ИПЗ	вклад радионуклида	ИПЗ	вклад радионуклида
Вода	$8,56 \cdot 10^{-4}$	¹³⁷ Cs (18%)	$2,68 \cdot 10^{-4}$	¹³⁷ Cs (10%)
		⁹⁰ Sr (2%)		⁹⁰ Sr (3%)
		^{239,240} Pu (15%)		^{239,240} Pu (9%)
		²⁴¹ Am (65%)		²⁴¹ Am (78%)
Донные отложения	$1,40 \cdot 10^{-3}$	¹³⁷ Cs (12%)	$9,05 \cdot 10^{-4}$	¹³⁷ Cs (10%)
		⁹⁰ Sr (2%)		⁹⁰ Sr (1%)
		^{239,240} Pu (13%)		^{239,240} Pu (12%)
		²⁴¹ Am (73%)		²⁴¹ Am (77%)

безопасности окружающей среды. Если индекс экологического риска или интегральный показатель загрязнения превышает уровень экологически приемлемого воздействия, но остается меньше уровня недопустимого воздействия, рекомендуют дополнительные исследования для снижения неопределенности оценки радиоэкологической обстановки. При превышении уровня недопустимого воздействия оценивается необходимость природоохранных мероприятий с учетом экологических, технологических и экономических факторов.

Показатели фонового радиационного воздействия используются для оценки влияния природных и техногенных факторов на радиоэкологическую обстановку путем сопоставления расчетных оценок индекса экологического риска и/или интегрального показателя загрязнения в исследуемом районе с фоновыми значениями.

3. Порядок оценки обобщенного показателя риска

С учетом опыта оценки воздействия на окружающую среду хозяйственной деятельности при определении обобщенного показателя риска принимаются во внимание пространственный масштаб, продолжительность и интенсивность радиационного воздействия [13, 14, 20, 21].

Расчет проводится по формуле

$$\text{ОПР} = A_{\text{пр}} \cdot A_{\text{вр}} \cdot \text{ИРВ}_6, \quad (3)$$

где $A_{\text{пр}}$ — коэффициент, учитывающий пространственный масштаб загрязнения территории, балл; $A_{\text{вр}}$ — коэффициент, учитывающий временной масштаб радиационного воздействия, балл; ИРВ_6 — показатель интенсивности радиационного воздействия, балл.

Пространственный масштаб радиационного воздействия определяется на основе данных мониторинга, модельных или экспертных оценок по следующим критериям:

- локальное воздействие на природную среду в районе размещения, санитарно-защитной зоне радиационного объекта или на территории площадью до 10 км^2 , $A_{\text{пр}} = 1$;
- местное воздействие на природную среду в зоне наблюдений радиационного объекта или на территории площадью до 100 км^2 , $A_{\text{пр}} = 2$;

- региональное воздействие за пределами зоны наблюдений радиационного объекта или на территории площадью свыше 100 км^2 , $A_{\text{пр}} = 3$.

Временной масштаб радиационного воздействия определяется на основе данных мониторинга, модельных или экспертных оценок по следующим критериям:

- кратковременное воздействие продолжительностью не более 1 месяца — 1 балл;
- воздействие продолжительностью не более 1 года — 2 балла;
- воздействие продолжительностью более 1 года — 3 балла.

Интенсивность радиационного воздействия определяется на основе расчетных оценок фоновых и максимальных индексов радиационной нагрузки или интегральных показателей загрязнения по данным мониторинга радиационной обстановки и моделирования по следующим критериям:

- незначительное воздействие при индексе радиационной нагрузки или интегральном показателе загрязнения, которые не отличаются значимо от фона, определяемого по данным наблюдений в соответствии с [4] как 95-й перцентиль, на территории всей зоны наблюдений;
- слабое воздействие при индексе радиационной нагрузки или интегральном показателе загрязнения менее 0,1;
- умеренное воздействие при индексе радиационной нагрузки или интегральном показателе загрязнения менее 1;
- сильное воздействие при индексе радиационной нагрузки или интегральном показателе загрязнения, больше или равном 1.

Показатели радиоэкологической обстановки при скрининговой оценке рекомендуется определять на территории зоны наблюдений с наиболее высокой удельной активностью техногенных радионуклидов.

В соответствии с постулатом порогового действия ионизирующей радиации на объекты живой природы [5, 6, 22—24] интенсивность радиационного воздействия при превышении ПДРН, т. е. при индексе экологического риска или интегральном показателе загрязнения, больше или равном 1, скачкообразно возрастает до 30 баллов, в 10 раз выше по сравнению с ситуацией умеренного воздействия (табл. 3).

Таблица 3. Шкала оценки интенсивности радиационного воздействия на природную среду

Table 3. Scale of assessment of the intensity of radiation exposure to the natural environment

Воздействие	Интенсивность радиационного воздействия		Балл
Незначительное	Изменения в природной среде не превышают пределы естественной изменчивости	Индекс экологического риска или интегральный показатель загрязнения не отличается от фоновых параметров на всей территории зоны наблюдений	1
Слабое	Превышаются пределы природной изменчивости, природная среда полностью самовосстанавливается	Максимальный индекс экологического риска или интегральный показатель загрязнения менее 0,1	2
Умеренное	Возможны нарушения отдельных эколого-физиологических параметров, природная среда сохраняет способность к восстановлению	Максимальный индекс экологического риска или интегральный показатель загрязнения менее 1	3
Сильное	Возможны значительные нарушения отдельных компонентов природной среды, видовой разнообразия, потеря способности природной среды к восстановлению	Максимальный индекс экологического риска или интегральный показатель загрязнения больше или равен 1	30

Таблица 4. Шкала оценки радиоэкологической обстановки и необходимости природоохранных мероприятий

Table 4. Scale of assessment of the radioecological situation and the need for environmental measures

Воздействие на радиоэкологическую обстановку	Обобщенный показатель риска	Рекомендации
Незначительное	$ОПР < 10$ ($ОПР_n < 0,33$)	Не требуются природоохранные мероприятия по обеспечению радиационной безопасности окружающей среды
Слабое	$10 \leq ОПР < 20$ ($0,33 \leq ОПР_n < 0,66$)	Оценивается влияние природных и техногенных факторов на радиационную обстановку территории путем сопоставления с фоном
Умеренное	$20 \leq ОПР < 30$ ($0,66 \leq ОПР_n < 1,00$)	Рекомендуются дополнительные исследования по снижению неопределенности в оценке радиоэкологической обстановки
Сильное	$ОПР \geq 30$ ($ОПР_n \geq 1,00$)	Оценивается необходимость природоохранных мероприятий с учетом экологических, технологических и экономических факторов

Примечание. $ОПР_n$ — значение ОПР, нормированное на 30 (максимальную интенсивность радиационного воздействия).

В целях интерпретации обобщенного показателя риска для интегральной оценки радиационной обстановки с учетом пространственного масштаба, продолжительности и интенсивности радиационного воздействия на природную среду используется шкала, приведенная в табл. 4 [13].

Обобщенный показатель риска рассчитывается отдельно для наземных и водных экосистем на основе максимальных значений в наземной (почва,

атмосферный воздух) и водной среде (вода, донные отложения).

Пример оценки обобщенного показателя риска для района расположения ФГУП «ПО «Маяк» показан в табл. 5 [12, 21, 25].

Согласно данным многолетнего мониторинга (2000—2021 гг.) [26], в зоне наблюдения ФГУП «ПО «Маяк» не превышаются экологические критерии, обеспечивающие радиационную безопасность

Таблица 5. Оценка обобщенного показателя риска в районе расположения ФГУП «ПО «Маяк», балл

Table 5. Assessment of the generalized risk indicator in the area of the location of PA "Mayak", mark

Природные объекты	A_{np}	$A_{вр}$	$ИРВ_6$	ОПР
Наземные экосистемы:				
• прибрежная территория вблизи промышленного водоема-хранилища ОРАО (Карачай)	1	3	30	90
• головная часть Восточно-Уральского радиоактивного следа	3	3	3	27
• вне головной части ВУРС	3	3	2	18
Водные экосистемы:				
• головная часть Восточно-Уральского радиоактивного следа	3	3	3	27
• озера вне головной части ВУРС	3	3	2	18
• река Теча	3	3	2	18
Региональный фон	1	3	1	3

окружающей среды, за исключением прибрежной территории вблизи промышленного водоема-хранилища ОРАО (водоема В-9 — Карачай), подвергшейся загрязнению в результате прошлой деятельности предприятия. Ширина прибрежной территории водоема Карачай, на которой превышаются уровни ПДРН на организмы биоты, составляет 30—50 м (Линге и др., 2014) [27], т. е. имеет место локальное радиационное воздействие на наземную биоту, не оказывающее значимого влияния на популяцию флоры и фауны за пределами этого локального участка.

При оценке ОПР для Ольховского болота в соответствии с площадью и продолжительностью воздействия $A_{np} = 1$, $A_{вр} = 3$. Максимальный показатель риска для биоты Ольховского болота оценен равным 0,25, поэтому $ИРВ_6 = 3$. Обобщенный показатель риска для болотно-речной экосистемы, рассчитанный с использованием данных радиационного мониторинга донных отложений Ольховского болота в 2000—2020 гг., равен 9 баллам. Таким образом, можно сделать вывод, что радиационное воздействие загрязнения техногенными радионуклидами донных отложений Ольховского болота на природные организмы является незначительным, не требующим специальных мероприятий по защите [16].

Оценка экологического риска была также выполнена для сценария гипотетической радиационной аварии с самопроизвольной цепной реакцией в случае попадания воды в реактор подводной лод-

ки К-27, затопленной в заливе Степового Карского моря на восточном побережье Новой Земли. Аварийный сброс долгоживущих техногенных радионуклидов в залив не приведет к значимому радиационному воздействию на население по причине отсутствия промышленного вылова рыбы и морепродуктов в заливе и разбавления сброшенной радиоактивности в открытом море. При этом гидробионты, обитающие в заливе, могут подвергнуться дополнительному облучению, в том числе по путям, отсутствующим для человека (например, облучение от загрязненных донных отложений) [28].

В табл. 6 представлены значения показателя риска для гидробионтов залива Степового, рассчитанные исходя из максимального значения мощности дозы облучения каждого организма при рассмотренном сценарии аварии. Наиболее высокий показатель риска оценен для морского млекопитающего — 0,07, что существенно ниже единицы; поэтому для рассмотренного сценария аварийного сброса радионуклидов не ожидается возникновения негативных радиационных эффектов для экосистемы залива Степового.

Для критического референтного организма залива Степового (морского млекопитающего) $ИРВ_6 = 2$; $A_{вр} = 3$. Площадь залива Степового составляет 25 км², тогда $A_{np} = 2$. Обобщенный показатель риска для морского млекопитающего из залива Степового при рассмотренном аварийном сценарии

Таблица 6. Показатель радиационного риска для гидробионтов залива Степового для рассмотренного аварийного сценария

Table 6. Radiation risk quotient, calculated for the marine biota of the Stepovogo Bay for the considered accidental scenario

Гидробионт	Максимальная мощность дозы, мГр/сут	ПДРН, мГр/сут	ИЭР
Рыба	$6,3 \cdot 10^{-4}$	1	$6,3 \cdot 10^{-4}$
Моллюск	$1,1 \cdot 10^{-3}$	10	$1,1 \cdot 10^{-4}$
Водное растение	$8,0 \cdot 10^{-4}$	1	$8,0 \cdot 10^{-4}$
Морское млекопитающее	$7,0 \cdot 10^{-3}$	0,1	$7,0 \cdot 10^{-2}$

равен 12. Таким образом, можно сделать вывод, что разовый сброс радиоактивных веществ в залив Степового при гипотетической аварии с самопроизвольной цепной реакцией с затопленной подводной лодкой К-27 окажет слабое радиационное воздействие на экосистему залива.

Заключение

Для оценки экологических рисков от радиоактивного загрязнения окружающей среды в районе размещения радиационно опасных объектов предлагается использовать следующие показатели:

- максимальный индекс экологического риска на представительные организмы биоты;
- интегральный показатель загрязнения, представляющий собой сумму отношения содержания радионуклидов к контрольному уровню.

Эти показатели могут рассматриваться в качестве базовых при оценке долговременного воздействия радиационно опасных объектов на окружающую среду. Использование интегрального показателя загрязнения более предпочтительно на практике, поскольку позволяет определять этот показатель непосредственно по данным мониторинга. Вместе с тем в некоторых задачах, например, в процедуре оценки воздействия на окружающую среду целесообразно применять индекс экологического риска, основанный на оценке мощности дозы облучения представительных организмов биоты, напрямую характеризующий радиационную безопасность окружающей среды.

Для интегральной оценки радиоэкологической обстановки может использоваться обобщенный показатель риска, оцениваемый в баллах с учетом площади и временной динамики загрязнения, а также

индекса экологического риска и интегрального показателя загрязнения территории.

Апробация предлагаемых показателей на основе данных мониторинга свидетельствует об их работоспособности и возможности практического применения для оценки радиоэкологической обстановки в районах расположения объектов использования атомной энергии и на загрязненных радионуклидами территориях [12, 14, 17, 25, 29].

Литература [References]

1. IAEA — International Atomic Energy Agency. International Basic Safety Standards, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, IAEA, Vienna. 2014. 438 p.
2. Крышев И.И., Рязанцев Е.П. Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России. Второе издание, переработанное и дополненное. М.: ИздАТ, 2010. 495 с. [Kryshch I.I., Ryazantsev E.P. Environmental safety of the nuclear energy complex of Russia. Second edition, revised and expanded. Moscow: IzdAT, 2010. 495 p., (In Russ.)]
3. Рекомендации Росгидромета Р.52.18.787-2013. Методика оценки радиационных рисков на основе данных мониторинга радиационной обстановки. Утверждены Росгидрометом Минприроды России 19.09.2013 / Крышев И.И., Сазыкина Т.Г., Крышев А.И., Каткова М.Н., Санина К.Д., Скакунова М.А., Вережанская К.В. Обнинск. ФГБУ «НПО «Тайфун». 2014. 108 с. [Recommendations of Roshydromet R.52.18.787-2013. Radiation risk assessment methodology based on radiation situation monitoring data. Approved by Roshydromet of the Ministry of Natural Resources of Russia 19.09.2013 / Kryshch I.I., Sazykina T.G., Kryshch A.I., Katkova M.N., Sanina K.D., Skakunova M.A., Verezhanskaya K.V. Obninsk. RPA "Typhoon". 2014. 108 p., (In Russ.)]

4. Рекомендации Росгидромета Р.52.18.863-2017. Методика определения радиационного фона по данным мониторинга радиационной обстановки / Булгаков В.Г., Крышев И.И., Каткова М.Н., Сазыкина Т.Г., Крышев А.И., Косых И.В., Скакунова М.А., Газиев И.Я. Обнинск. ФГБУ «НПО «Тайфун». 2017. 41 с. [Recommendations of Roshydromet R. 52.18.863-2017. Methodology for determining the radiation background according to monitoring data of the radiation situation / Bulgakov V.G., Kryshch I.I., Katkova M.N., Sazykina T.G., Kryshch A.I., Kosykh I.V., Skakunova M.A., Gaziev I.Ya. Obninsk. RPA "Typhoon". 2017. 41 p., (In Russ.)]
5. Рекомендации Росгидромета Р.52.18.820-2015. Оценка радиационно-экологического воздействия на объекты природной среды по данным мониторинга радиационной обстановки. Утверждены Росгидрометом Минприроды России 17.04.2015 / Сазыкина Т.Г., Крышев А.И., Крышев И.И., Лунёва К.В., Скакунова М.А., Санина К.Д. Обнинск. ФГБУ «НПО «Тайфун». 2015. 64 с. [Recommendations of Roshydromet R.52.18.820-2015. Assessment of the radiation and environmental impact on the objects of the natural environment according to the monitoring of the radiation situation / Sazykina T.G., Kryshch A.I., Kryshch I.I., Luneva K.V., Skakunova M.A., Sanina K.D. Obninsk. RPA "Typhoon". 2015. 64 p., (In Russ.)]
6. ICRP — International Commission on Radiological Protection. Publication 108. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants. Ann. ICRP 38(4–6). 2008. 251 p.
7. Рекомендации Росгидромета Р.52.18.852-2016. Порядок расчета контрольных уровней содержания радионуклидов в морских водах. Утверждены Росгидрометом Минприроды России 17.08.2016 / Сазыкина Т.Г., Крышев И.И., Крышев А.И., Санина К.Д., Лунёва К.В., Косых И.В., Скакунова М.А. В сборнике: Порядок расчета контрольных уровней содержания радионуклидов в объектах природной среды. Обнинск. 2016. С. 3—28. [Recommendations of Roshydromet R.52.18.852-2016. The procedure for calculating the control levels of radionuclides in marine waters / Sazykina T.G., Kryshch I.I., Kryshch A.I., Sanina K.D., Luneva K.V., Kosykh I.V., Skakunova M.A. In the collection: The procedure for calculating control levels of radionuclides in objects of the natural environment. Obninsk. 2016:3-28, (In Russ.)]
8. Рекомендации Росгидромета Р.52.18.853-2016. Порядок расчета контрольных уровней содержания радионуклидов в пресной воде и почве. Утверждены Росгидрометом Минприроды России 17.08.2016 / Крышев А.И., Сазыкина Т.Г., Крышев И.И., Лунёва К.В., Санина К.Д., Косых И.В., Скакунова М.А., Дайнеко Е.И. В сборнике: Порядок расчета контрольных уровней содержания радионуклидов в объектах природной среды. Обнинск. 2016. С. 29—55. [Recommendations of Roshydromet R.52.18.853-2016. The procedure for calculating the control levels of radionuclides in fresh water and soil / Kryshch A.I., Sazykina T.G., Kryshch I.I., Luneva K.V., Sanina K.D., Kosykh I.V., Skakunova M.A., Daineko E.I. In the collection: The procedure for calculating the control levels of the content of radionuclides in the objects of the natural environment. Obninsk. 2016:29-55, (In Russ.)]
9. Рекомендации Росгидромета Р.52.18.873-2018. Порядок расчета контрольных уровней содержания радионуклидов в донных отложениях морских водных объектов. Утверждены Руководителем Росгидромета от 31.10.2018 № 456 / Сазыкина Т.Г., Крышев И.И., Крышев А.И., Каткова М.Н., Косых И.В., Газиев И.Я. Обнинск. 2019. 29 с. [Recommendations of Roshydromet R.52.18.873-2018. The procedure for calculating the control levels of radionuclides in the bottom sediments of marine water objects / Sazykina T.G., Kryshch I.I., Kryshch A.I., Katkova M.N., Kosykh I.V., Gaziev I.Ya. Obninsk. 2019. 29 p., (In Russ.)]
10. Рекомендации Росгидромета Р.52.18.876-2019. Порядок расчета контрольных уровней содержания радионуклидов в донных отложениях пресноводных водных объектов. Утверждены Руководителем Росгидромета 29.03.2019 / Сазыкина Т.Г., Крышев И.И., Крышев А.И., Каткова М.Н., Косых И.В., Газиев И.Я. Обнинск. 2020. 33 с. [Recommendations of Roshydromet R.52.18.876-2019. The procedure for calculating the control levels of radionuclides in the bottom sediments of freshwater bodies of water objects / Sazykina T.G., Kryshch I.I., Kryshch A.I., Katkova M.N., Kosykh I.V., Gaziev I.Ya. Obninsk. 2020. 33 p., (In Russ.)]
11. Рекомендации Росгидромета Р.52.18.913-2021. Порядок расчета контрольных уровней содержания радионуклидов в атмосферном воздухе. Утверждены приказом Росгидромета от 23.08.2021 № 273 / Сазыкина Т.Г., Крышев И.И., Крышев А.И., Косых И.В.,

- Газиев И.Я., Бурякова А.А. Обнинск. 2021. 50 с. [Recommendations of Roshydromet R.52.18.913-2021. The procedure for calculating the control levels of radionuclides in atmospheric air / Sazykina T.G., Kryshev I.I., Kryshev A.I., Kosykh I.V., Gaziev I.Ya., Buryakova A.A. Obninsk. 2021. 50 p., (In Russ.)]
12. Крышев И.И., Сазыкина Т.Г., Крышев А.И., Косых И.В., Павлова Н.Н., Бурякова А.А. Принципы и критерии экологического нормирования качества окружающей среды по уровням радиоактивности // *Метеорология и гидрология*. 2021. № 5. С. 31—37, <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2021-5-31-37> [Kryshev I.I., Sazykina T.G., Kryshev A.I., Kosykh I.V., Pavlova N.N., Buryakova A.A. Approaches and criteria for ecological regulation of environmental quality by radioactivity levels // *Meteorology and Hydrology*. 2021;(5):31-37, (In Russ.), <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2021-5-31-37>]
 13. Рекомендации Росгидромета Р.52.18.923-2022. Порядок оценки риска от радиоактивного загрязнения окружающей среды по данным мониторинга радиационной обстановки / Крышев И.И., Павлова Н.Н., Сазыкина Т.Г., Крышев А.И., Косых И.В., Бурякова А.А., Газиев И.Я. Обнинск. НПО «Тайфун». 2022. 28 с. [Recommendations of Roshydromet R.52.18.923-2022. The procedure for assessing the risk of radioactive contamination of the environment according to the monitoring of the radiation situation / Kryshev I.I., Pavlova N.N., Sazykina T.G., Kryshev A.I., Kosykh I.V., Buryakova A.A., Gaziev I.Ya. Obninsk. RPA “Typhoon”. 2022. 28 p., (In Russ.)]
 14. Сазыкина Т.Г., Крышев А.И., Крышев И.И. Моделирование радиоэкологических процессов в окружающей среде. М.: Маска. 2022. 638 с. [Sazykina T.G., Kryshev A.I., Kryshev I.I. Modeling of radioecological processes in the environment. Moscow: Mask. 2022. 638 p., (In Russ.)]
 15. ICRP — International Commission on Radiological Protection. Publication 136. Dose coefficients for non-human biota environmentally exposed to radiation. *Ann. ICRP* 46(2). 2017. 92 p.
 16. Крышев А.И., Косых И.В., Крышев И.И. Анализ экологического риска радиоактивного загрязнения Ольховского болота // *Атомная энергия*. 2022. Т. 132. № 1. С. 43—36. [Kryshev A.I., Kosykh I.V., Kryshev I.I. Analysis of the environmental risk of radioactive contamination of the Olkhovsky swamp // *Atomic Energy*. 2022;132(1):43-36, (In Russ.)]
 17. Косых И.В., Крышев А.И., Крышев И.И. Оценка показателей техногенного радиационного фона по данным многолетнего мониторинга поверхностных вод в районе Белоярской АЭС // *Вопросы радиационной безопасности*. 2021. № 1 (101). С. 51—58. [Kosykh I.V., Kryshev A.I., Kryshev I.I. Evaluation of parameters of technogenic background radiation based on long-term monitoring of surface water in the vicinity of the Beloyarsk NPP // *Issues of radiation safety*. 2021;(1):51-58, (In Russ.)]
 18. Бурякова А.А., Павлова Н.Н., Крышев И.И., Каткова М.Н. Динамика и современное состояние радиоэкологической обстановки на территориях аварийного чернобыльского следа в Брянской области // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2021. Т. 61. № 3. С. 277—285, <https://doi.org/10.31857/S0869803121030048> [Buryakova A.A., Pavlova N.N., Kryshev I.I., Katkova M.N. Dynamics and current state of radioecological situation on the territories of the Chernobyl radioactive trace in the Bryansk region // *Radiation Biology. Radioecology*. 2021;61(3):277-285, (In Russ.), <https://doi.org/10.31857/S0869803121030048>]
 19. Росновская Н.А., Крышев И.И., Крышев А.И., Каткова М.Н. Показатели качества морской среды по уровню активности радионуклидов для экосистемы Карского моря // *Метеорология и гидрология*. 2023. № 4. С. 91—98 [Rosnovskaya N.A., Kryshev I.I., Kryshev A.I., Katkova M.N. Quality Indicators of the Marine Environment by the Level of Radionuclide Activity for the Kara Sea Ecosystem // *Meteorology and Hydrology*. 2023;(4):34-39, (In Russ.)]
 20. Методические указания по проведению оценки воздействия хозяйственной деятельности на окружающую среду. Министерство охраны окружающей среды Республики Казахстан. Астана. 2010. 73 с. [Methodological guidelines for assessing the impact of economic activity on the environment. Ministry of Environmental Protection of the Republic of Kazakhstan. Astana. 2010. 73 p., (In Russ.)]
 21. Крышев И.И., Павлова Н.Н., Сазыкина Т.Г., Крышев А.И., Косых И.В., Бурякова А.А., Газиев И.Я. Оценка радиационной безопасности окружающей среды в зоне наблюдения объектов использования атомной энергии // *Атомная энергия*. 2021. Т. 130. № 2. С. 111—116. [Kryshev I.I., Pavlova N.N., Sazykina T.G., Kryshev A.I., Kosykh I.V., Buryakova A.A., Gaziev I.Ya. Environmental radiation safety assessment in the control area at nuclear facilities // *Atomic Energy*. 2021;130(2):111-116, (In Russ.)]

22. Sazykina TG, Kryshch AI, Sanina KD. Non-parametric estimation of thresholds for radiation effects in vertebrate species under chronic low-LET exposures. *Radiat Environ Biophys.* 2009 Nov;48(4):391-404, doi: 10.1007/s00411-009-0233-0. Epub 2009 Jun 17. PMID: 19533159.
23. UN — United Nations. Effects of radiation on the environment. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume II, Scientific Annex E. Effect of ionizing radiation on non-human biota. United Nations. New York. 2011. 164 p.
24. US DOE. United States Department of Energy. A graded approach for evaluating radiation doses to aquatic and terrestrial biota. DOE-STD-1153-2019. U.S.DOE. Washington DC. 2019. 169 p.
25. Крышев И.И., Павлова Н.Н., Косых И.В., Бурякова А.А., Сазыкина Т.Г., Крышев А.И. Анализ динамики радиоэкологической обстановки в зоне наблюдений ФГУП «ПО «МАЯК». Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях: Сб. материалов XI Российской научной конференции, 26—29 октября 2021 г., Москва / Под общ. ред. Л.А. Большова. Том 2. Материалы секции № 1 «Радиационная безопасность». М.: ИБРАЭ РАН, 2022. С. 172—177. [Kryshch I.I., Pavlova N.N., Kosykh I.V., Buryakova A.A., Sazykina T.G., Kryshch A.I. Analysis of the dynamics of the radioecological situation in the observation zone of PA «МАЯК». Radiation Protection and Radiation Safety in Nuclear Technologies: Collection of Materials of the XI Russian Scientific Conference, October 26—29, 2021. Volume 2. Materials of Section No. 1 «Radiation safety». Moscow: IBRAE RAN, 2022:172-177, (In Russ.)]
26. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств. Росгидромет, НПО «Тайфун». Ежегодники. 2001—2022. [Radiation situation on the territory of Russia and neighboring states. Roshydromet, RPA «Typhoon». Yearbook. 2001—2022, (In Russ.)]
27. Линге И.И., Крышев И.И., Курындина Л.А., Сазыкина Т.Г., Ведерникова М.В., Уткин С.С., Мокров Ю.Г. Оценка ущерба от радиационного воздействия на окружающую среду в районе расположения водоема Карачай // Вопросы радиационной безопасности. 2014. С. 34—42. [Linge I.I., Kryshch I.I., Kuryndina L.A., Sazykina T.G., Vedernikova M.V., Utkin S.S., Mokrov Yu.G. Detriment estimation resulted from radiation impact on Karachai water body environment // Radiation safety issues. 2014;(2):34-42, (In Russ.)]
28. Крышев А. И., Сазыкина Т. Г., Каткова М. Н., Крышев И. И., Бурякова А. А., Павлова Н. Н. Оценка экологического риска для биоты залива Степового Карского моря при гипотетическом аварийном загрязнении // Радиационная биология. Радиоэкология. 2022. Т. 62. № 4. С. 424—433. [Kryshch A.I., Sazykina T.G., Katkova M.N., Kryshch I.I., Buryakova A.A., Pavlova N.N. Assessment of ecological risk to biota of the Stepovogo Bay of the Kara Sea after the hypothetical accidental contamination // Radiation Biology. Radioecology. 2022;62(4):424-433, (In Russ.)]
29. Крышев А.И., Сазыкина Т.Г., Крышев И.И., Косых И.В., Павлова Н.Н., Бурякова А.А., Газиев И.Я. Радиоэкологические критерии радиационной безопасности окружающей среды при использовании ядерных технологий. Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях: Сб. материалов XI Российской научной конференции, 26—29 октября 2021 г., Москва / Под общ. ред. Л. А. Большова. Том 2. Материалы секции № 1 «Радиационная безопасность». М.: ИБРАЭ РАН, 2022. С. 41—47. [Kryshch A.I., Sazykina T.G., Kryshch I.I., Kosykh I.V., Pavlova N.N., Buryakova A.A., Gaziev I.Ya. Radioecological criteria of radiation safety of the environment when using nuclear technologies. — Radiation Protection and Radiation Safety in Nuclear Technologies: Collection of Materials of the XI Russian Scientific Conference, October 26—29, 2021. Vol. 2. Materials of section No. 1 «Radiation safety». Moscow: IBRAE RAN, 2022:41-47, (In Russ.)]

Сведения об авторах

Крышев Иван Иванович: доктор физико-математических наук, профессор, академик РАЕН, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-производственное объединение «Тайфун» (ФГБУ «НПО «Тайфун»)

Количество публикаций: более 490

Область научных интересов: радиоэкологический мониторинг, экологические риски, экологическое моделирование, радиационная безопасность окружающей среды, разработка показателей качества окружающей среды

Author ID: 60378

Scopus Author ID: 7004198434

Контактная информация:

Адрес: 249038, Калужская область, г. Обнинск, ул. Победы, д. 4
kryshch@rpatyphoon.ru

Павлова Надежда Николаевна: кандидат биологических наук, научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-производственное объединение «Тайфун» (ФГБУ «НПО «Тайфун»)

Количество публикаций: более 70

Область научных интересов: радиоэкологический мониторинг, экологическое нормирование загрязнения почв, экологические риски

Author ID: 755 964

Scopus Author ID: 57211508893

ORCID: 0000-0003-3460-0234

Контактная информация:

Адрес: 249038, Калужская область, г. Обнинск, ул. Победы, д. 4

nadpavl@yandex.ru

Сазыкина Татьяна Григорьевна: доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-производственное объединение «Тайфун» (ФГБУ «НПО «Тайфун»)

Количество публикаций: более 320

Область научных интересов: экологическое моделирование, экологическая дозиметрия, экологические риски, радиоэкологический мониторинг, экология Арктики

Author ID: 132573

Scopus Author ID: 6603832974

Контактная информация:

Адрес: 249038, Калужская область, г. Обнинск, ул. Победы, д. 4
sazykina@rpatyphoon.ru

Крышев Александр Иванович: доктор биологических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-производственное объединение «Тайфун» (ФГБУ «НПО «Тайфун»)

Количество публикаций: более 230

Область научных интересов: моделирование миграции радионуклидов в окружающей среде, радиоэкологический мониторинг, экологические риски, радиоэкология Арктики

Author ID: 132575

Scopus Author ID: 6603584776

ResearcherID: S-7427-2018

Контактная информация:

Адрес: 249038, Калужская область, г. Обнинск, ул. Победы, д. 4
kai@rpatyphoon.ru

Косых Ирина Владимировна: научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-производственное объединение «Тайфун» (ФГБУ «НПО «Тайфун»)

Количество публикаций: более 70

Область научных интересов: радиоэкологический мониторинг, экологические риски, базы радиоэкологических данных

Author ID: 1088627

Scopus Author ID: 6505528255

Контактная информация:

Адрес: 249038, Калужская область, г. Обнинск, ул. Победы, д. 4
ivk@rpatyphoon.ru

Бурякова Анна Александровна: младший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-производственное объединение «Тайфун» (ФГБУ «НПО «Тайфун»)

Количество публикаций: более 50

Область научных интересов: радиоэкологический мониторинг, экологические риски

Author ID: 1088244

Scopus Author ID: 57203977733

Контактная информация:

Адрес: 249038, Калужская область, г. Обнинск, ул. Победы, д. 4
buriakova@rpatyphoon.ru

Росновская Нелли Александровна: инженер Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-производственное объединение «Тайфун» (ФГБУ «НПО «Тайфун»)

Количество публикаций: 7

Область научных интересов: радиоэкологический мониторинг, радиоэкология Арктики

Контактная информация:

Адрес: 249038, Калужская область, г. Обнинск, ул. Победы, д. 4
rosnovskaya@rpatyphoon.ru

Статья поступила в редакцию: 07.04.2023

Одобрена после рецензирования: 12.05.2023

Принята к публикации: 16.05.2023

Дата публикации: 30.06.2023

The article was submitted: 07.04.2023

Approved after reviewing: 12.05.2023

Accepted for publication: 16.05.2023

Date of publication: 30.06.2023