

ДИНАМИКА СОСТАВА РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ И РАНЖИРОВАНИЕ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

М. Г. Герменчук¹, Н. Н. Цыбулько², П. К. Шалькевич³, Т. В. Дашкевич⁴

¹ К. т. н., доцент, заместитель директора по научной работе УО «Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова БГУ», Минск, Беларусь, e-mail: germenchuk@iseu.by

² Д. с.-х. н., профессор, начальник научно-исследовательского сектора УО «Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова БГУ», Минск, Беларусь, e-mail: res_sector@iseu.by

³ К. т. н., доцент, доцент УО «Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова БГУ», Минск, Беларусь, e-mail: shalkevich@iseu.by

⁴ Старший преподаватель кафедры ядерной и радиационной безопасности УО «Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова БГУ», Минск, Беларусь, e-mail: dashkevich.tv@gmail.com

Реферат

В статье представлены результаты анализа динамики состава радиационной обстановки и ранжирования радиоэкологических рисков на территории Республики Беларусь за период 1945–2024 гг. Выделены и описаны шесть временных циклов, наиболее значимых для радиационной безопасности в Республике Беларусь, выполнена оценка степени и приемлемости риска в различные периоды. В настоящее время для Республики Беларусь наиболее «значимые» риски представляет радиоактивное загрязнение окружающей среды после катастрофы на Чернобыльской АЭС, вторым по значимости источником угроз и рисков является действующая Белорусская АЭС. Показано, что одним из ключевых элементов механизмов управления рисками является мониторинг и прогноз радиационной обстановки в окружающей среде при различном составе угроз и рисков.

Ключевые слова: радиационная безопасность, механизмы управления радиоэкологическими рисками, идентификация и квантификация рисков, степень риска, ранжирование и приемлемость рисков, мониторинг и прогноз радиационной обстановки.

DYNAMICS OF THE COMPOSITION OF RADIATION SITUATION AND RANKING OF RADIOECOLOGICAL RISKS IN THE TERRITORY OF THE REPUBLIC OF BELARUS

M. G. Germenchuk, M. M. Tsybulka, P. K. Shalkevich, T. V. Dashkevich

Abstract

The article presents the results of an analysis of the dynamics of the composition of the radiation situation and the ranking of radioecological risks on the territory of the Republic of Belarus for the period 1945–2024. Six time cycles that are most important for radiation safety in the Republic of Belarus are identified and described. An assessment of the rank and acceptability of risk in different periods was carried out. Currently, for the Republic of Belarus, the most “significant” risks are posed by radioactive contamination of the environment after the catastrophe at the Chernobyl NPP, the second most important source of threats and risks is the Belarusian nuclear power plant. The article shows that one of the key elements of risk management mechanisms is monitoring and prognosis the radiation situation in the environment with a different composition of threats and risks.

Keywords: radiation safety, mechanisms for managing radioecological risks, identification and quantification of risks, rank of risk, ranking and acceptability of risks, monitoring and prognosis of the radiation situation.

Введение

Анализ общественной практики в сфере обеспечения радиационной безопасности человека и окружающей среды (далее – ОРБ) показывает, что в настоящее время в Республике Беларусь присутствуют 15 основных действующих и потенциальных радиоэкологических рисков, при этом существуют долговременные тенденции роста актуальности проблем обеспечения радиационной безопасности, что подтверждается высокими оценками степени радиоэкологических рисков (далее – RR) [1, 2].

В настоящее время представлены и апробированы модели деятельности в сфере ОРБ и общий алгоритм управления рисками (механизмы управления рисками) с заданными обратными связями, методы идентификации, квантификации и калибровки радиоэкологических рисков [2].

Для дальнейшего обеспечения эффективной деятельности в сфере ОРБ необходимо иметь научно обоснованные подходы к оценке и динамике как самой радиационной обстановки в окружающей среде с использованием системы радиационного мониторинга, так и к оценке и ранжированию радиоэкологических рисков по степени риска RR.

Для оценки динамики угроз и рисков в сфере ОРБ для Республики Беларусь необходимо определить границы временных циклов, важных для ОРБ, оценить состав радиационной обстановки в окружающей среде в каждом из них, а также провести ранжирование угроз и рисков и оценку их приемлемости для повышения эффективности деятельности в сфере ОРБ.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования рассмотрим ОРБ как проблемосодержащую область, которая включает в себя в том числе угрозы и риски, а также оценки степени рисков RR и их приемлемости, в качестве предмета исследования – связи между составом радиационной обстановки, составом угроз и рисков и их RR на территории Республики Беларусь во временном контексте. Степень риска RR рассматривается как произведение двух величин: воздействия риска и вероятности риска [1].

Для Республики Беларусь при ранжировании рисков рассматриваются идентифицированные, категоризованные угрозы и риски и их квантифицированные RR, рассчитанные с использованием адаптированной к проблемам ОРБ «RR6 – Матрицы определения качественных/полукачественных и количественных (квантифицированных) оценок степени риска RR» [2]. Для целей ранжирования рисков по их степени выделены две категории рисков: «действующие (Д)» и «потенциальные (П)» (таблица 1).

Для выявления и описания основных циклов и оценки динамики угроз и рисков в сфере ОРБ в Республике Беларусь, а также состава радиационной обстановки в окружающей среде в 1945–2024 гг., был использован экспертный метод в сочетании с логико-историческим подходом, в основу которого положен следующий принцип: с возникновением нового типа источника угроз и рисков в ОРБ открывается новый цикл.

Таблица 1 – Действующие и потенциальные угрозы и риски, диапазоны степени риска в сфере ОРБ на территории Республики Беларусь [2]

	Действующие угрозы и риски	Диапазон Степени риска, <i>RR</i>
Д1	Глобальное («бомбовое») загрязнение после применения и испытаний ядерного оружия	<1
Д2	«Чернобыльское» радиоактивное загрязнение первый острый период катастрофы в ситуации аварийного облучения в ситуации существующего облучения «Фукусимское» радиоактивное загрязнение	>> 25
		20 ÷ 25
		10 ÷ 19
Д3	Белорусская АЭС (первый и второй блок), хранилища РАО, другие действующие ОИАЭ	6 ÷ 14
Д4	Чернобыльская АЭС (1977 г.), Ровенская АЭС (1980 г.), Смоленская АЭС (1982 г.), Игналинская АЭС (1983 г.)	6 ÷ 11
Д5	ГНУ «ОИЭЯИ-СОСНЫ», пункты захоронения отходов дезактивации на «чернобыльских» территориях, КУП «Экорес» и др.	6 ÷ 11
Д6	Источники ионизирующего излучения, используемые в организациях, действующих на территории страны	6 ÷ 11
Д7	Обнаруженные ранее утерянные источники ионизирующего излучения	4 ÷ 8
	Потенциальные угрозы и риски	
П1	Планируемые к строительству ОИАЭ и объекты по обращению с РАО	4 ÷ 8
П2	Строительство хранилищ радиоактивных отходов на промплощадках Игналинской АЭС при выводе станции из эксплуатации	4 ÷ 8
П3	Транспортировка радиоактивных материалов через территорию Республики Беларусь	4 ÷ 5
П4	Незаконное использование радиоактивных материалов и источников ионизирующего излучения (ИИИ)	4 ÷ 8
П5	ИИИ, санкционированно перевозимые по территории страны	4 ÷ 5
П6	Радиологический/ядерный терроризм	4 ÷ 8
П7	Утерянные источники ионизирующего излучения	4 ÷ 6
П8	Трансграничный перенос загрязняющих веществ на территорию Республики Беларусь воздушными и водными потоками, в том числе в аварийной ситуации	6 ÷ 11

Кроме того, были использованы адаптированные для целей ОРБ 4-х фазная структура модели безопасности и основные элементы управления рисками, которые предусматривают [1, 2, 3]:

I. Признание проблемы на научном и социальном уровне, оценка ее общественной значимости (элемент А: выделение проблемосодержащей области через обмен информацией и консультирование).

II. Формулирование политики радиационной безопасности (элемент В: установление контекста проблемы в части выбора объектов защиты и оценки их уязвимости, определения значимых для ОРБ источников угроз и рисков; элемент С: оценка рисков, включая квантификацию, идентификацию и категоризацию, а также анализ рисков (степени рисков) с последующей калибровкой диапазонов, систематическим ранжированием и оценкой неопределенностей; элемент D: выбор стратегии для обработки риска в сфере ОРБ).

III. Реализация политики радиационной безопасности (элемент Е: комплекс оперативных и долговременных мер по предупреждению и нейтрализации угроз и рисков в сфере радиационной безопасности).

IV. Оценка результатов настоящей и планируемой деятельности с использованием ядерной энергии и в ОРБ (элемент F: мониторинг результатов с анализом уязвимости объектов защиты).

При ранжировании угроз по степени риска *RR* (элемент С), был использован сценарный подход, который предполагает, что существуют как минимум три возможных варианта развития событий в сфере ОРБ: негативный – реалистичный – благоприятный, при этом на вербальном уровне можно принять, что верхняя граница диапазона *RR6* – Матрицы соотносится с негативным сценарием, а нижняя – с благоприятным [2].

Состав радиационной обстановки в окружающей среде и радиозоологические риски

В течение 80 лет (1945–2024 гг.) деятельность по использованию ядерной энергии в самых разнообразных целях стала неотъемлемой частью жизни человечества и оказывает масштабное воздействие на биосферу и техносферу, порождая новые виды угроз и рисков и меняя радиационную обстановку в окружающей среде.

С использованием логико-исторического анализа выделены шесть временных циклов, в пяти из которых возникали новые потенциальные или действующие источники угроз и рисков в сфере ОРБ, они представлены в виде таблицы 2.

Как показывает ретроспективный анализ состава радиационной обстановки, практическая реализация угроз с выбросом радиоактивных веществ в окружающую среду приводит к изменению состава радиационной обстановки в биосфере, при этом сам состав с каждым последующим циклом постоянно усложняется.

Особое значение имеет **нулевой** цикл как «эталонное» радиационное состояние, когда радиационная обстановка определяется только природным радиационным фоном (далее – ПРФ) и отсутствует радиоактивное загрязнение окружающей среды [4]. Важно принять во внимание, что ПРФ является эталоном в любом цикле, при этом «фоновое» загрязнение для каждого последующего цикла определяется составом радиационной обстановки предыдущего цикла. Так, например, для **первого** цикла радиационной обстановки, обусловленной радиоактивным глобальным «бомбовым» загрязнением, начиная с 1945 года фоном и эталоном является ПРФ, а для «чернобыльского» радиоактивного загрязнения (1986 г.) фоном является глобальное «бомбовое» загрязнение и ПРФ.

По состоянию на май 2024 года радиационная обстановка на территории Республики Беларусь имеет следующий состав: ПРФ, глобальное «бомбовое» загрязнение, локальные загрязнения от утерянных ИИИ, «чернобыльское» и «фукусимское» загрязнения (таблица 2).

Отметим, что радиационная обстановка меняется вследствие естественных процессов: радиоактивного распада радионуклидов и их миграции в биосфере, а также антропогенного вмешательства. Исходя из этого следует принять, что результаты мониторинга и прогноз радиационной обстановки в окружающей среде, а также результаты мониторинга чрезвычайных ситуаций должны учитываться при оценке и изучении динамики самой степени риска для последующего ранжирования.

Анализ во времени показывает, что число основных идентифицированных на сегодня в составе действующих угроз и рисков, важных для ОРБ Республики Беларусь, начиная с 1945 года постоянно увеличивается (1 → 5 → 6 → 6 → 7), возникают новые действующие угрозы, например, катастрофа на Чернобыльской АЭС или ввод в эксплуатацию Белорусской АЭС (таблица 2).

Состав угроз и рисков идентифицированных потенциальных угроз и рисков, известных сегодня, также увеличивается (6 → 6 → 6 → 8 → 8). В качестве примера отметим, что на первом, втором и третьем циклах среди источников угроз и рисков отсутствует П2 (например, хранилища РАО на промплощадке Игналинской АЭС в процессе вывода из эксплуатации) и П6 (радиологический/ядерный терроризм), эти риски появляются в четвертом цикле.

Следует обратить внимание, что эти экспертные оценки даются, исходя из оценки практики ОРБ, накопленной к 2024 году, однако важно отметить тенденцию – количество потенциальных угроз и рисков не уменьшается, и этот рост связан с расширением деятельности с использованием ядерной энергии. Кроме того, включение в анализ потенциальных рисков, идентифицированных по состоянию на 2024 год, позволяет провести научно обоснованный ретроспективный анализ эффективности деятельности в сфере ОРБ для выявления путей формирования, анализа и управления организационными рисками [2].

Таблица 2 – Динамика угроз и рисков в сфере ОРБ в Республике Беларусь и состав радиационной обстановки в окружающей среде (1945–2024 гг.)

Цикл / кол-во источников	Риски и угрозы		Временной период действия источника(ов) / появление нового источника	Составляющие радиационной обстановки
	действующие	потенциальные		
0	–	–	До 1945 г.	ПРФ
1 (1 + 6)	Д1	П1, П3, П4, П5, П7, П8	С 1945 г. по 1970 г.	ПРФ, глобальное (бомбовое) загрязнение
2 (5 + 6)	Д1 Д4, Д5, Д6, Д7	П1, П3, П4, П5, П7, П8	С 1970 г. по апрель 1986 г.	ПРФ, глобальное загрязнение, локальные загрязнения от утерянных ИИИ
3 (6 + 6)	Д1 Д4, Д5, Д6, Д7 Д2 (катастрофа на ЧАЭС)	П1, П3, П4, П5, П7, П8	1986 г. катастрофа на ЧАЭС	ПРФ, глобальное загрязнение, локальные загрязнения от утерянных ИИИ, «чернобыльское» загрязнение
4 (6 + 8)	Д1 Д4, Д5, Д6, Д7 Д2 (катастрофы на ЧАЭС и ФАЭС)	П1, П2, П3, П4, П5, П6, П7, П8	1986 – март 2011 г. катастрофа на Фукусимской АЭС	ПРФ, глобальное загрязнение, локальные загрязнения от утерянных ИИИ, «чернобыльское» и «фукусимское» загрязнения
5 (7 + 8)	Д1 Д2 (катастрофы на ЧАЭС и ФАЭС) Д3 Д4, Д5, Д6, Д7	П1, П2, П3, П4, П5, П6, П7, П8	2011–2024 гг. строительство и ввод в эксплуатацию Белорусской АЭС в 2020 году	ПРФ, глобальное загрязнение, локальные загрязнения от утерянных ИИИ, «чернобыльское» и «фукусимское» загрязнения

Как показано выше, при описании элемента (С) структуры модели безопасной деятельности одним из основных условий эффективного функционирования механизмов управления рисками в сфере ОРБ является системная оценка *RR* с последующим ранжированием идентифицированных действующих и потенциальных угроз рисков и оценкой их приемлемости.

Анализ динамики *RR* и приемлемости риска

В общепринятой практике управления рискам в качестве оценки приемлемости риска используется следующий подход: *RR* в диапазоне 0–4 означает «приемлемый» риск, в диапазоне 5–8 оценивается как «контролируемый» риск, в диапазоне 9–25 как «значимый» риск [1]. Однако для целей ОРБ целесообразно эти подходы представить более детально: диапазон «приемлемого» риска составит 0–4,9, «контролируемого» 5–8,9, «значимого» 9–25 и более. Введение такой детализации обусловлено тем, что, как показано в [2], шаг оценки рисков при минимальном воздействии составляет 1, что требует оценки *RR* с точностью до десятых долей. Результаты анализа приемлемости риска в различные временные периоды представлены в таблице 3.

Отметим, что в сфере ядерной и радиационной безопасности в качестве критерия приемлемости риска также используют понятие «вероятностные показатели безопасности объекта использования атомной энергии» (далее – ВПБ ОИАЭ), который применяется при

проектировании и эксплуатации самого ОИАЭ. Уровень безопасности ОИАЭ оценивается как приемлемый, если оцененные по результатам вероятностного анализа безопасности значения ВПБ не превышают установленные целевые значения. Согласно практике в сфере ядерной безопасности целевые значения приемлемого риска/ВПБ ОИАЭ можно определить как «оцененное с помощью вероятностного анализа безопасности значение вероятности предельного аварийного выброса находится в диапазоне $10^{-7} \div 10^{-5}$ на реактор в год» [5, 6]. Таким образом, по аналогии можно принять, что диапазон *RR* от 0 до 4,9 соответствует диапазону ВПБ ОИАЭ от 10^{-7} до 10^{-5} .

С применением логико-исторического подхода сценарным методом с использованием таблиц 1 и 2 был проведен ретроспективный анализ динамики *RR* действующих и потенциальных угроз и рисков в выделенных циклах и представлен на рисунках 1 и 2.

Ретроспективный анализ степени риска и практики управления рисками в сфере ОРБ для Республики Беларусь начнем с «нулевого» цикла, когда радиационная обстановка характеризуется только естественными источниками радиоактивности в окружающей среде, который может рассматриваться как эталонный/фоновый для первого цикла, когда негативное воздействие ничтожно даже в случае самого неблагоприятного сценария, связанного с природными рисками, поэтому $RR \leq 1$ (таблицы 1 и 2), риск оценивался как приемлемый (таблица 3), создания механизмов управления рисками для защиты населения не требовалось.

Таблица 3 – Степень приемлемости риска в различных временных циклах деятельности в сфере ОРБ в Республике Беларусь

Цикл / кол-во источников	Степень риска <i>RR</i> / приемлемость риска, источник риска		
	0–4,9 приемлемый	5–8,9 контролируемый	9–25 и более значимый
0	явного риска нет	–	–
1 (1 + 6)	Д1, П3, П4, П5, П7, П8	П1	–
2 (5 + 6)	Д1	Д4, Д5, Д6, Д7, П1, П3, П4, П5, П7, П8	–
3 (6 + 6)	Д1	Д4, Д5, Д6, Д7, П1, П3, П4, П5, П7, П8	Д2 (катастрофа на Чернобыльской АЭС)
4 (6 + 8)	Д1 Д2 (катастрофа на Фукусимской АЭС)	Д4, Д5, Д6, Д7, П1, П2, П3, П4, П5, П6, П7, П8	Д2 (катастрофа на Чернобыльской АЭС)
5 (7 + 8)	Д1 Д2 (катастрофа на Фукусимской АЭС)	Д4, Д5, Д6, Д7, П1, П2, П3, П4, П5, П6, П7, П8	Д2 (катастрофа на Чернобыльской АЭС) Д3 (Белорусская АЭС)

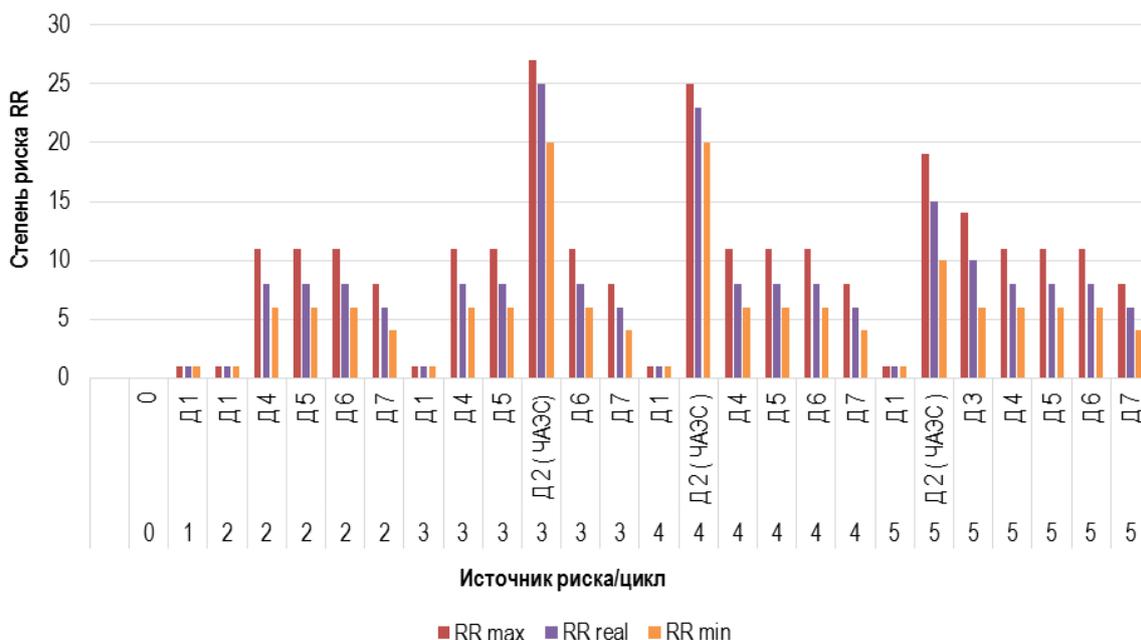


Рисунок 1 – Динамика степени идентифицированных действующих рисков (RR) для Республики Беларусь (1945–2024 гг.)

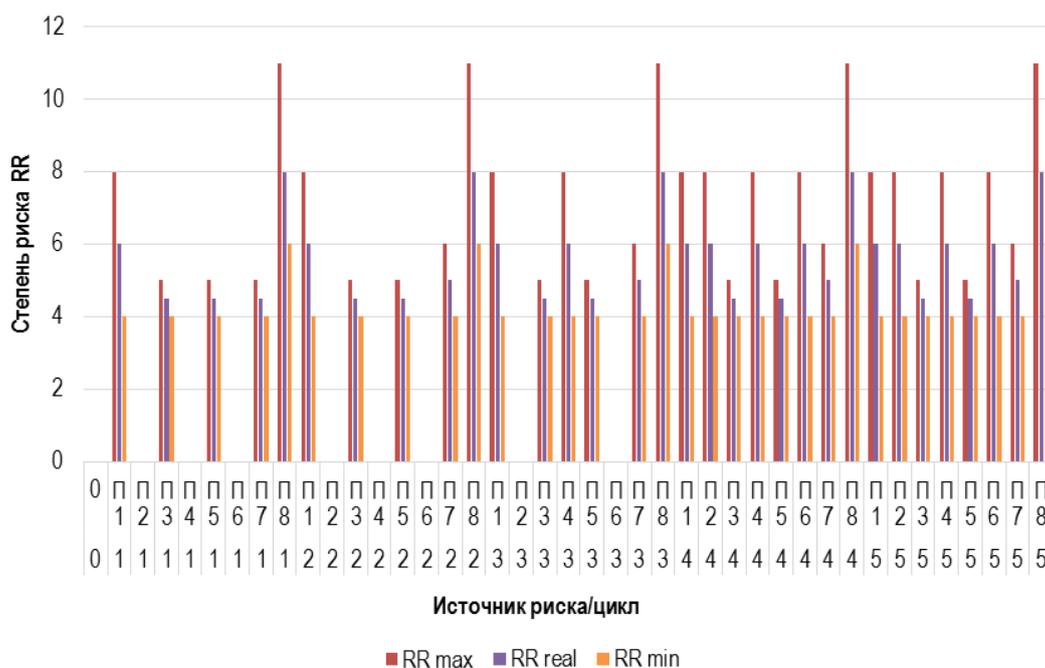


Рисунок 2 – Динамика степени идентифицированных потенциальных рисков (RR) для Республики Беларусь (1945–2024 гг.)

В первом цикле можно выделить один действующий и шесть потенциальных источников угроз и рисков (таблица 2), когда радиационная обстановка определялась глобальным радиоактивным загрязнением окружающей среды изотопами цезия-137, стронция-90 и изотопами плутония вследствие применения и испытаний ядерного оружия (Д1), RR оценивалась как ≤ 1 , иными словами, степень риска от этого источника была и остается «приемлемой» (таблица 3), поэтому необходимость в формировании механизмов управления риском от источника Д1 отсутствовала.

В этот период сформировалось загрязнение почвы радиоактивными изотопами цезия-137, стронция-90 и плутония, при этом по результатам измерений поверхностная активность цезия-137 на территории Европы составляла от 1 до 3,5 кБк/кв.м, в том числе для Беларуси 2 – 3,5 кБк/кв.м. Отметим, что это загрязнение, наряду с ПРФ, составляло радиационную обстановку в окружающей среде до

апреля 1986 года (таблицы 1, 2 и рисунок 3). В дальнейшем эти значения использовались как «фоновые» для оценки «чернобыльского» загрязнения [7].

Обратим внимание, что уже в первом цикле в составе потенциальных угроз П1 присутствовали планируемые к строительству в непосредственной близости от Беларуси четыре АЭС, среди которых – Чернобыльская АЭС, при этом RR можно было оценить в диапазоне $4 \div 8$, когда приемлемость риска изменяется от «приемлемого» до «контролируемого». Во втором цикле эти угрозы (Чернобыльская АЭС – 1977 г., Ровенская АЭС – 1980 г., Смоленская АЭС – 1982 г., Игналинская АЭС – 1983 г.) перешли из потенциальных в действующие (Д4) с RR $6 \div 11$, когда риск переходит в стадию «контролируемого», или в случае неблагоприятного сценария становится «значимым», как это реализовалось в случае катастрофы на Чернобыльской АЭС (рисунок 4 и таблица 3).

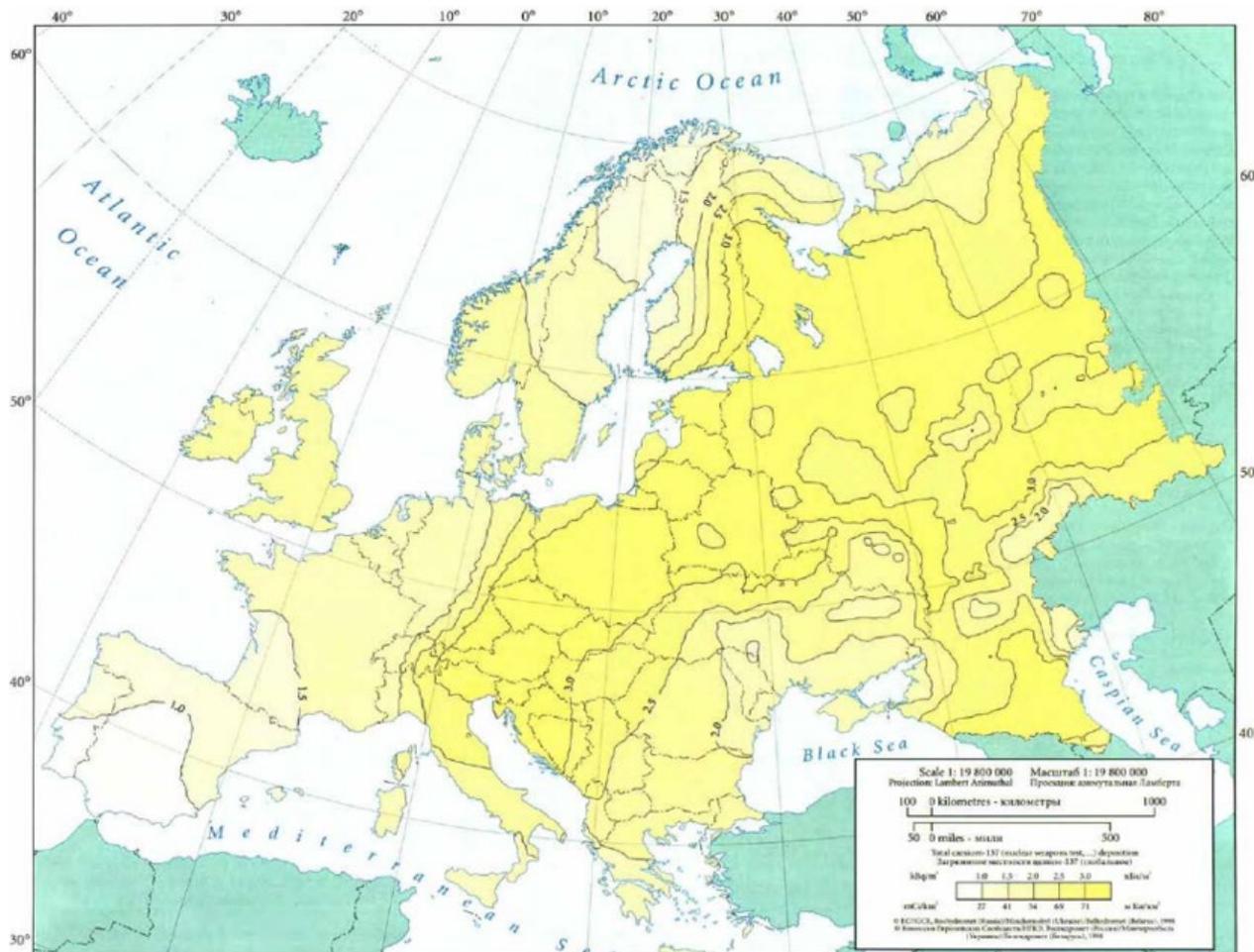


Рисунок 3 – Загрязнение Европы цезием-137 вследствие испытаний ядерного оружия в атмосфере (начало 1986 года) [7]

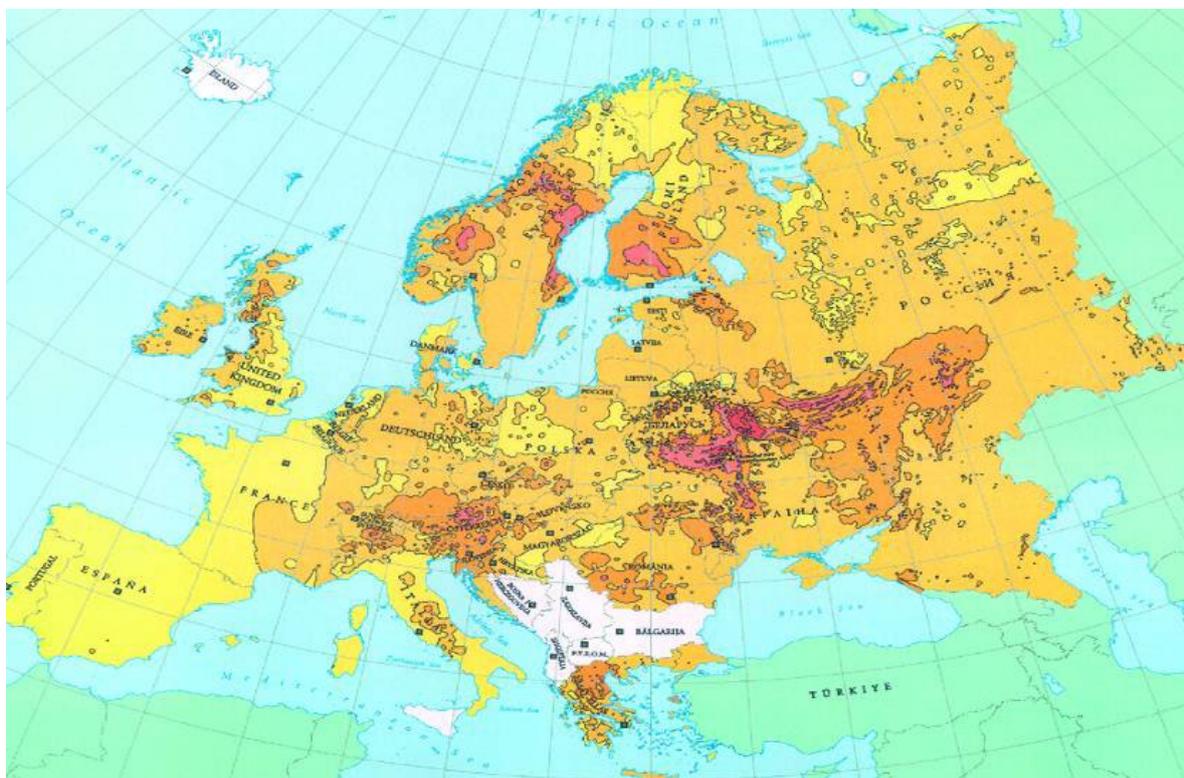


Рисунок 4 – Европейская карта загрязнения цезием-137 по состоянию на 10 мая 1986 года [7]

Кроме того, в связи с расширением деятельности с использованием ядерной энергии во **втором** цикле возникли новые действующие источники угроз и рисков (Д5, Д6, Д7), например, исследовательский ядерный реактор в институте ядерной энергетики (ныне ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» НАН Беларуси), а также потенциальные (П1, П3, П4, П5, П7, П8), которые остаются актуальными в 2024 году и далее.

Однако отметим, что в **первом** и **втором** циклах механизмы управления рисками для этих угроз ограничивались только мерами ядерной и радиационной безопасности на самих объектах и прилегающих зонах (до 30-ти км), при этом угроза П8 (трансграничный перенос) полностью игнорировалась.

Таким образом, уже в **первом** и **втором** циклах (до апреля 1986 г.) сформировались организационные риски в виде отсутствия практики идентификации потенциальных и действующих угроз и рисков, а также отсутствия решений по созданию механизмов управления как прямыми радиологическими/радиозоологическими рисками, в том числе организации мониторинга и прогноза радиационной обстановки в окружающей среде как средства раннего оповещения и реагирования, так и организационными рисками, в том числе в виде программ по обеспечению ядерной безопасности с приемлемым уровнем риска в диапазоне $10^{-7} \div 10^{-5}$ (для оператора ОИАЭ).

После катастрофы на Чернобыльской АЭС в 1986 году (**третий** цикл) на территории Беларуси, Европы и всего Северного полушария появились новые действующие прямые радиологические / радиозоологические угрозы и риски (Д2), которые сформировали высокие уровни загрязнения в окружающей среде. Карта радиоактивного загрязнения цезием-137 территории Европы по состоянию на 10 мая 1986 г. представлена на рисунке 4 [7].

В целом по Европе уровни загрязнения почвы цезием-137 были сравнимы с глобальным «бомбовым» радиоактивным загрязнением и не превышали 185 кБк/кв.м, однако на территориях Беларуси, Украины и Российской Федерации эти уровни достигали 1 500 кБк/кв.м, а в зоне отчуждения и отселения, а также на расстоянии 200 км от эпицентра катастрофы на территории Чериковского района Могилевской области в Беларуси (д. Чудяны), достигали 18 500 кБк/кв.м и более (рисунок 4) [7]. Кроме того, на территориях Беларуси и Украины были отмечены высокие уровни загрязнения почвы стронцием-90 и долгоживущими изотопами плутония-238, 239, 240.

В первый период после катастрофы на Чернобыльской АЭС в 1986 г. из-за загрязнения окружающей среды территории Беларуси короткоживущими изотопами, в первую очередь, йода-131, 133, рутения-103, 106, бария-140, стронция-89 и др., а также средне- и долгоживущими изотопами цезия-134, 137, стронция-90 и изотопами плутония, *RR* можно оценить как «высокую» ($RR > 25$), а для территорий, непосредственно прилегающих к Чернобыльской АЭС, как «крайне высокую» ($RR \gg 25$) [4, 5, 8]. Степень приемлемости риска следует оценить как «значимые риски» (таблица 3). Однако в этот период отсутствовал эффективный механизм управления рисками с учетом их временной и пространственной динамики.

Из-за отсутствия таких механизмов и надежной информационной основы для принятия управленческих решений по обеспечению радиационной безопасности населения и территорий Республики Беларусь в первые часы и дни после начала катастрофы ущерб, в том числе социальные, не только не были минимизированы, но и существенно усугубились [9].

С одной стороны, организационные риски стали непосредственной причиной самой аварии: ошибки в планировании эксперимента, в управлении самим ОИАЭ, сознательные нарушения регламента эксплуатации действующего энергоблока, ошибки персонала и др. [10]. С другой стороны, реализация именно организационных рисков при формировании механизмов управления рисками и технических рисков на ОИАЭ в значительной степени предопределили беспрецедентный масштаб последствий катастрофы, в том числе социальных. Академик В. А. Легасов такие ситуации, когда системные ошибки и проблемы своевременно не выявляются, затем накапливаются и усугубляются в течение месяцев и лет, классифицировал как «ползучие катастрофы» [11].

¹ Предполагается, что чрезвычайные ситуации могут быть «обычные (быстрые)» (часы и дни) и «медленные (ползучие)» (от месяца до десятилетий) [11].

Системные ошибки формирования механизмов управления рисками, в том числе системы радиационного мониторинга окружающей среды, накопившиеся к апрелю 1986 года, не позволили заранее оценить возможные риски, уязвимость объектов защиты и потенциальные угрозы, а также подготовить прогноз радиационной обстановки в окружающей среде и оперативно оценить масштабы радиоактивного загрязнения при возникновении аварийной ситуации на Чернобыльской АЭС.

Это связано с тем, что из-за накопившихся организационных рисков система мониторинга и прогноза радиационной обстановки не была готова к реагированию на реализацию ранее уже известной прямой радиологической/радиозоологической угрозы – АЭС, находящейся в непосредственной близости от границы Беларуси. В более широком смысле можно говорить об отсутствии эффективных механизмов управления рисками в сфере ОРБ.

В Республике Беларусь до 26 апреля 1986 года действовала система мониторинга и прогноза радиационной обстановки в окружающей среде, предназначенная для обеспечения механизмов управления рисками, связанных с глобальным (бомбовым) радиоактивным загрязнением (источник Д1), когда измерения мощности дозы проводились раз в неделю (по средам) на 8-ми пунктах наблюдений, расстояния между которыми составляли более 100 км.

В этом случае система не могла обеспечить достижение своих системных целей – социально-приемлемый уровень радиационной безопасности настоящих и будущих поколений и окружающей среды в условиях новой действующей прямой радиологической угрозы – катастрофы на Чернобыльской АЭС (Д2), то есть система перестала быть эффективной.

Таким образом, в апреле 1986 года состав угроз и рисков в сфере ОРБ расширился от Д1 до Д1 + Д2 + П8, что обусловило возникновение радиозоологической проблемной ситуации в сфере ОРБ, а степень риска до апреля 1986 года могла быть оценена как минимум как «низкая» или «средняя» ($RR \div 11$). Однако вследствие того, что своевременно не были применены механизмы управления рисками, например «минимизация» риска за счет аварийного планирования и реализации мер в сфере ядерной безопасности на ОИАЭ, на практике степень риска достигла уровней «высокая» и «крайне высокая» ($RR = 25$ и более) [2].

Согласно общему алгоритму управления рисками радиационной безопасности актуальные оценки степени риска в сфере ОРБ для Республики Беларусь должны выполняться на систематической основе для выполнения анализа возможных вариантов снижения рисков (элемент D) и выполнения комплекса оперативных и долговременных мер по предупреждению и нейтрализации угроз и рисков радиационной безопасности (элемент E), что, как показывает практика, до начала Чернобыльской катастрофы и в первый период выполнено не было.

С точки зрения применения мета-, квази-, пред-, текущих и пост-оценок к деятельности в области ОРБ во время катастрофы на Чернобыльской АЭС и на последующих этапах, необходимо отметить, что корректировка политики и мер в этой области деятельности произошла достаточно быстро и в целом в настоящее время удовлетворяет текущие потребности, то есть систематически выполняется оценка результатов и корректировка комплекса мер, в том числе на основе мониторинга программ (элемент F).

В **четвертом** цикле в ситуации аварийного облучения *RR* от источника (Д2) можно оценить как «крайне высокую» ($20 \div 25$ баллов) и «высокую» ($15 \div 19$ баллов), в ситуации существующего облучения после 2024 года как «среднюю» ($10 \div 14$ баллов). Отметим, что даже при благоприятном сценарии приемлемость риска оценивается как «значимый» риск.

После катастрофы на Фукусимской АЭС в марте 2011 года появился новый действующий источник угроз и рисков в сфере ОРБ, имеющий глобальные масштабы. Однако для территории Европы и Беларуси его негативное воздействие на человека и объекты окружающей среды вследствие незначительного радиоактивного загрязнения атмосферы цезием-134, 137 и йодом-131, которое было зафиксировано в Беларуси в период 20–24 марта, оказалось несущественным/ничтожным (Д2) и степень риска может быть оценена как отсутствие «явных рисков» ($RR < 1$) [4].

К сожалению, анализ событий во время аварии на Фукусимской АЭС и на Чернобыльской АЭС (Д2) подтвердил, что неявно выраженные организационные риски значительным образом повлияли на

рост степени риска в целом от события и обусловили глобальный масштаб радиоактивного загрязнения окружающей среды, при этом понятно, что в Японии степень риска в 2011 году составляла $RR \gg 25$.

Отметим, что в четвертом цикле уже можно говорить о формировании системы управления рисками в сфере ОРБ. В этом цикле началась систематическая работа по идентификации угроз и рисков, например, действующие угрозы Д4 и потенциальная П2 были определены как важные для радиационной безопасности Республики Беларусь.

В настоящее время вокруг Беларуси на расстоянии до 100 км от границ страны находятся две действующие АЭС (75 и 65 км от границы). Кроме того, два ОИАЭ – Игналинская и Чернобыльская АЭС (4 км и 12 км от границы) находятся в стадии вывода из эксплуатации.

Дальнейший анализ действующих радиологических / радиозоологических угроз и рисков в четвертом и пятом циклах показывает, что для радиационной безопасности страны значительную опасность представляют АЭС как на территории Беларуси, так и вокруг ее границ (Д3) и (Д4) (рисунок 5).

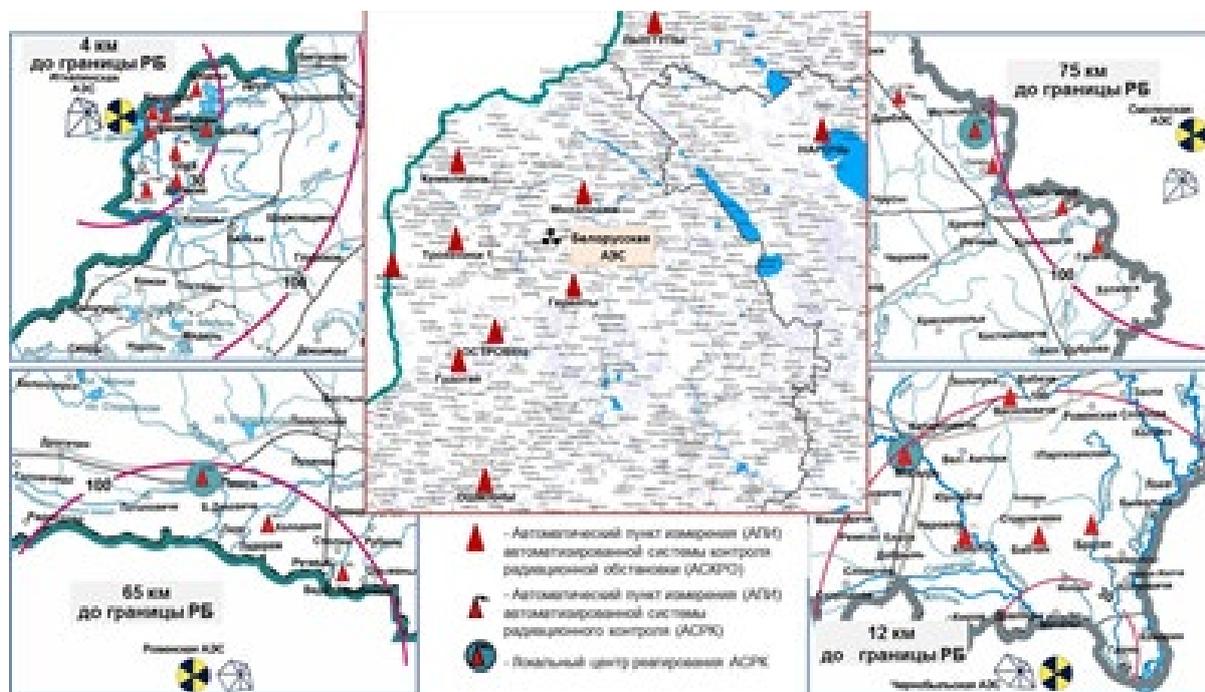


Рисунок 5 – Зоны влияния приграничных АЭС и Белорусской АЭС на территории Республики Беларусь и пункты АСКРО

В пятом цикле появляется еще один источник риска – введенная в эксплуатацию Белорусская АЭС, риск от которой может быть «значимым» при неблагоприятном сценарии ($RR = 14$) и контролируемым при реалистичном ($RR = 10$) и благоприятном сценариях ($RR = 6$), при этом механизмы управления рисками для этого источника были созданы еще в процессе строительства АЭС.

Как указано выше, один из важнейших элементов модели деятельности в сфере безопасности (Е) в комплексе оперативных и долгосрочных мер по предупреждению и нейтрализации угроз и рисков в сфере радиационной безопасности предусматривает эффективное функционирование системы мониторинга и прогноза радиационной обстановки, которая требует научных и организационных решений. Научные решения реализуются путем создания научно обоснованного аппарата оценки и прогнозирования радиационной обстановки в окружающей среде и эффективности системы мониторинга, организационные решения реализуются в виде программ радиационного мониторинга, в том числе программ аварийного реагирования с определением и обеспечением необходимых финансовых, технических и кадровых ресурсов.

В качестве одного из технических решений по оценке мощности полей ионизирующего излучения и наличия/отсутствия «свежих» продуктов деления в атмосферном воздухе и в целях раннего предупреждения об аварийном радиоактивном загрязнении/угрозе загрязнения в зонах влияния 5-ти АЭС развернуты системы автоматизированного контроля текущей радиационной обстановки (далее – АСКРО), как это показано на рисунке 5, которые позволяют обеспечить информационную поддержку для реализации стратегии обработки рисков от источников Д3 и Д4.

В зоне наблюдения Белорусской АЭС с 2014 года осуществляется мониторинг радиационной обстановки в окружающей среде. Результаты показывают, что радиационная обстановка соответствует радиаци-

онной обстановке, зафиксированной перед началом строительства, негативного воздействия АЭС на окружающую среду не отмечено [12]. В целях обеспечения аварийной готовности ежедневно рассчитывается прогноз изменения радиационной обстановки в окружающей среде на основании анализа текущей синоптической ситуации.

Для хранения РАО на каждом энергоблоке Белорусской АЭС предусмотрено специально оборудованное хранилище РАО. В соответствии со Стратегией обращения с радиоактивными отходами, утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 15.02.2023 № 128, высокоактивные РАО будут храниться на территории Белорусской АЭС в течение всего срока ее службы (60 лет), РАО с меньшей активностью будут храниться на территории Белорусской АЭС 10 лет с последующим их транспортированием и размещением в специальном пункте захоронения РАО (Д3, П1, П2, П3).

По состоянию на начало 2024 года самыми крупными ядерными объектами Республики Беларусь являются Белорусская АЭС (Д 3) и ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» НАН Беларуси, на площадке которого действуют пять установок, которые являются источниками угроз и рисков в сфере ОРБ (Д 5): ядерно-физические комплексы «Гиацинт», «Кристалл», подкритический стенд «Яліна», хранилище свежего ядерного топлива «Явар», пункт хранения ядерных материалов» [Обзор ГАН – 2023].

Как источник прямых радиологических/радиозоологических угроз рисков требует особого внимания расположенное в центре страны УП «Экорес» (Д5), в составе которого с 1963 года действует специализированное предприятие по обращению с РАО, образовавшиеся в результате деятельности медицинских, научных, промышленных предприятий и учреждений. В 2022 году на долговременное хранение было принято 673 кг РАО и 484 отработавших закрытых радионуклидных ИИИ, общей суммарной активностью $1,08 \cdot 10^{16}$ Бк,

в 2023 году предприятие приняло на долговременное хранение 4038 кг РАО, суммарной активностью $1,47 \cdot 10^{13}$ Бк и 2040 отработавших свой ресурс закрытых радионуклидных ИИИ, общей суммарной активностью $4,24 \cdot 10^{15}$ Бк [12, 13].

Кроме того, согласно [12] по состоянию на 31 декабря 2022 г. под надзором государственного регулятора в сфере ядерной и радиационной безопасности – Департамента по ядерной и радиационной безопасности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, находятся 1855 субъектов экономики, которые используют в своей деятельности 24 674 ИИИ (Д6).

При соблюдении всех требований радиационной безопасности при действующих угрозах (Д3, 4, 5, 6) вероятность аварийных событий может быть оценена как «маловероятные», а даже «маловероятные» события в сочетании с возможным «высоким» воздействием создают степень риска, оцениваемую как «низкую». При этом в случае, если событие на каком-либо из указанных ОИАЭ становится «достаточно вероятным», степень риска достигает «среднего» уровня, а при «вполне вероятном» событии степень риска может стать «высокой».

В практике ОРБ проблемы с утерянными источниками ионизирующего излучения Д7, как и проблемы, связанные с угрозами и рисками радиологического/ядерного терроризма, с одной стороны могут быть расценены как потенциальные, когда неизвестно время и место реализации угрозы (П6, П7), однако в случае, когда угроза становится действующей, например, обнаруживаются ранее утерянные ИИИ (Д7), требуется реализация защитных мероприятий, которые должны быть предусмотрены в составе механизмов управления рисками. Так, по данным ежегодных Обзоров состояния ядерной и радиационной безопасности в Республике Беларусь, представляемых Департаментом по ядерной и радиационной безопасности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, в 2022 году было зарегистрировано четыре случая, связанных с обнаружением утерянных радиоактивных источников и иными радиационными инцидентами, в 2021 – два, в 2020 – пять, в 2019 – десять, в 2018 году – пять. При этом степень риска может изменять в диапазоне от «низкой» до «высокой».

Ранжирование актуальных радиозокологических рисков

Исходя из требований элемента (С) модели деятельности в сфере безопасности, выполнено ранжирование актуальных идентифицированных действующих и потенциальных угроз и рисков по степени риска (RR) для Республики Беларусь (рисунки 1, 2 и 6).

По состоянию на 2024 год для Республики Беларусь из 15 идентифицированных основных источников угроз и рисков в сфере ОРБ на первом месте остаются последствия катастрофы на Чернобыльской АЭС (Д2), максимальная степень риска этой угрозы на 2024 год может достигать $RR = 19$ (рисунок 6).

Это обусловлено тем, что, во-первых, действующий источник (радиоактивное загрязнение окружающей среды) уже оказал «крайне высокое» и «высокое» воздействие на объекты защиты (человек и окружающая среда), под его негативное воздействие попали 23 % территории страны, где проживало более одного миллиона жителей, и в настоящее время продолжает быть действующим источником. Во-вторых, по результатам мониторинга и прогноза радиационной обстановки в окружающей среде, в Республике Беларусь «чернобыльское» загрязнение в разной степени будет продолжать воздействовать на человека и окружающую среду в течение ближайших столетий [14].

Радиационная обстановка в окружающей среде в целом, исключая территории, где присутствует радиоактивное загрязнение трансураниевыми элементами, будет постепенно улучшаться, реализация государственных программ по минимизации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС будет обеспечивать социально приемлемый уровень радиационной безопасности человека, что позволяет рассматривать реалистичный и в будущем благоприятный сценарий, при реалистичном сценарии $RR = 15$, при благоприятном $RR = 10$, однако даже в этом случае риск оценивается как «значимый».

Вторым по значимости является источник Д3 – Белорусская АЭС и радиационно-опасные объекты, находящиеся на ее площадке, в том числе объекты по обращению с РАО. Для Белорусской АЭС при негативном сценарии RR может достигать 14 («значимый» риск), при реалистичном 10 («значимый риск»), при благоприятном (при выполнении всех требований безопасности) – 6 («контролируемый» риск).

При рассмотрении благоприятного сценария, все риски, за исключением П8 (трансграничный перенос загрязняющих веществ на территорию Беларуси), могут быть отнесены к «приемлемым» (RR изменяется от 0 до 4), а риски от П8 – к «контролируемым» ($RR = 6$). В случае реалистичного сценария риски от источников П1, П2, П4, П6, П7 и П8 оцениваются как «контролируемые» (RR изменяется от 6 до 8), остальные (П3, П5) оцениваются как «приемлемые» ($RR = 4,5$). В случае реализации неблагоприятного сценария риски от источника П8 могут быть оценены как «значимые» ($RR = 11$), остальные идентифицированные риски относятся к «контролируемым» (RR изменяется от 5 до 8).

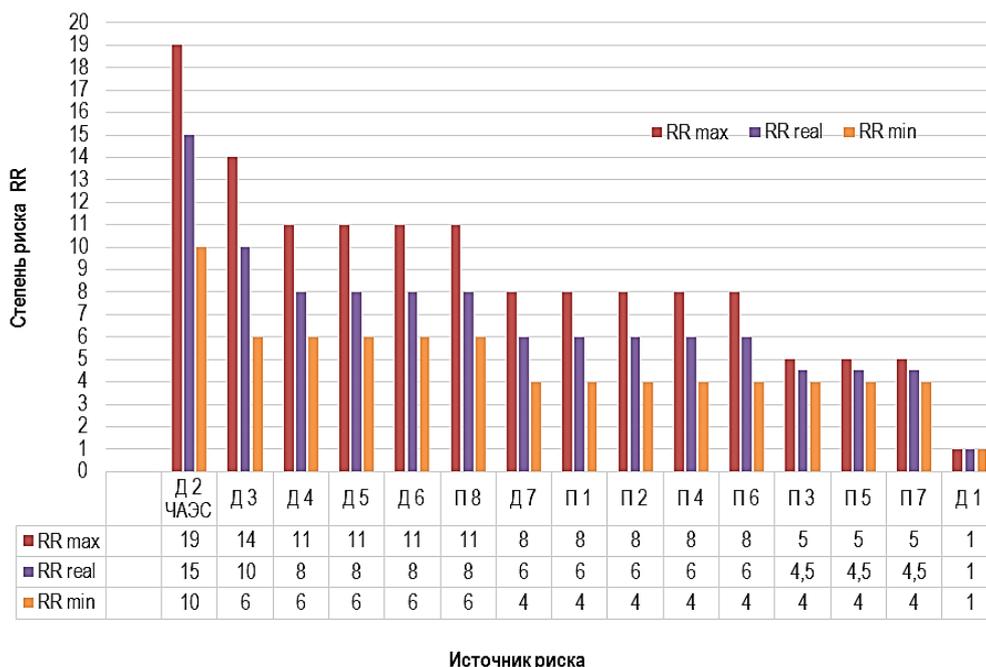


Рисунок 6 – Ранжирование действующих и потенциальных угроз и рисков по степени риска (RR) для Республики Беларусь по состоянию на 2024 год

Работа выполнена в рамках задания НИР 1 «Оценка и прогноз радиоактивного загрязнения окружающей среды вокруг радиационно опасных объектов на основе экспериментальных и расчетных методов (моделирование)» в рамках задания 3.05 «Развитие информационного и методического обеспечения мониторинга, аудита, сертификации и реабилитации природно-территориальных комплексов», №ГР2021720 подпрограммы «Радиация и биологические системы» ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 годы.

Заключение

На основании изучения динамики угроз и рисков выделены и описаны шесть временных циклов, наиболее значимых для ОРБ в Республике Беларусь, выполнена оценка степени и приемлемости риска в каждом цикле.

Для каждого из выделенных временных циклов изучен и описан состав радиационной обстановки, показано, что состав непрерывно расширяется и усложняется, при этом для каждого последующего этапа предыдущая радиационная обстановка является «фоновой», ПРФ является эталоном радиационной обстановки для любого цикла.

С использованием логико-исторического анализа деятельности в сфере ОРБ в период 1945 – 2024 гг. для Республики Беларусь выявлена прямая зависимость между числом идентифицированных действующих и потенциальных рисков в сфере ОРБ (7 → 11 → 12 → 14 → 15) и степенью их воздействия RR (от ≤ 1 до 25 и более) и обратная зависимость между числом угроз и приемлемостью риска для общества: явного риска нет → приемлемый риск (до 1977 г.) → контролируемый риск (1970–1986 гг.) → значимый риск (1986–2024 гг.).

Показано, что для Республики Беларусь риски в сфере ОРБ можно оценивать как «приемлемые» только до 70-х годов прошлого столетия, в последующих циклах риски могут быть оценены как «контролируемые», затем «значимые» и требуют формирования эффективных механизмов управления радиологическими / радиоэкологическими рисками.

Анализ практики ОРБ показал, что сочетание организационных и технических рисков на ОИАЭ в отсутствие механизма управления ядерными и радиационными/радиоэкологическими рисками привели к катастрофе на Чернобыльской АЭС и беспрецедентному по своим масштабам радиоактивному загрязнению биосферы Северного полушария планеты.

Катастрофа на Чернобыльской АЭС и масштаб ее последствий для населения, окружающей среды и экономики явилась следствием «ползучей катастрофы», которая развивалась в течение десятилетий и имеет долгосрочные последствия уже в XXI веке.

Ранжирование актуальных на 2024 год основных угроз и рисков в сфере ОРБ показывает, с 1986 года катастрофа на Чернобыльской АЭС вплоть до настоящего времени и, вероятно, на ближайшие десятилетия представляет наиболее масштабную по своему воздействию угрозу радиационной безопасности населению и окружающей среде Республики Беларусь, максимальная степень риска этой угрозы достигает $RR = 19$ и относится к категории «значительных» рисков.

На втором месте находится Белорусская АЭС, в случае неблагоприятного сценария максимальная степень риска RR может достигнуть 14 («значимый» риск), при самом благоприятном – 6 («контролируемый» риск). Из иных выделенных 15-ти основных источников угроз и рисков, важных для ОРБ Республики Беларусь, при неблагоприятных сценариях могут быть оценены как «значимые» риски, в их числе ОИАЭ в стране и АЭС вокруг границ Беларуси, ИИИ, трансграничный перенос радиоактивных веществ, остальные угрозы и риски, за исключением глобального бомбового загрязнения, могут быть отнесены к «контролируемым» рискам.

Таким образом, для реализации политики радиационной безопасности человека и окружающей среды в Республике Беларусь на социально-приемлемом уровне, механизмы управления радиологическими/радиоэкологическими рисками в составе комплекса оперативных и долговременных мер по предупреждению и нейтрализации угроз и рисков должны на системной основе учитывать динамику состава радиационной обстановки в окружающей среде и результаты ранжирования идентифицированных действующих и потенциальных рисков в сфере ОРБ. При этом одним из ключевых элементов механизмов управления рисками является мониторинг и прогноз радиационной обстановки в окружающей среде при различном составе угроз и рисков.

Список цитированных источников

1. Менеджмент риска. Техники оценки риска : СТБ IEC 31010-2022. – Введ. 01.08.2023. – Минск : Госстандарт, 2023. – 116 с.
2. Герменчук, М. Г. Основные механизмы управления рисками в сфере радиационной безопасности и мониторинг окружающей среды / М. Г. Герменчук, Н. Н. Цыбулько // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2024. – № 1 (133). – С. 160–168. – <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2024-133-1-160-168>.
3. Руководящие принципы мониторинга и оценки трансграничных озер. Рабочая группа Европейской экономической комиссии по мониторингу и оценке [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://unece.org/DAM/env/water/publications/assessment/Lakesguidelines_A_B_russian.pdf. – Дата доступа: 15.02.2024.
4. Герменчук, М. Г. Радиационный мониторинг окружающей среды: учебное пособие / М. Г. Герменчук. – Минск : Вышэйшая школа, 2021. – 278 с.
5. Герменчук, М. Г., Научные основы радиационного мониторинга окружающей среды и роль гидрометеорологической службы в его организации на примере катастрофы на ЧАЭС / М. Г. Герменчук, О. М. Жукова // Экологический вестник. – Минск : МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ. – 2014. – № 4. – С. 12–25.
6. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (ОПБ-88/97). НП-001-97 (Утв. постановлением Госатомнадзора России от 14 ноября 1997 г. № 9) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=97305>. – Дата доступа 30.05.2024.
7. Атлас загрязнения Европы цезием после Чернобыльской аварии: сборник карт / М. Г. Герменчук [и др.] ; под общ. ред. Ю. А. Израэля. – Люксембург : Люксембургское бюро для официальных изданий европейских сообществ, 1998. – 65 с.
8. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси: сборник карт / М. Г. Герменчук [и др.] ; под ред. Ю. А. Израэля, И. М. Богдевича. – Минск : Белкартография, 2009. – 135 с.
9. Герменчук, М. Г. Управление системой радиационного мониторинга окружающей среды : учебно-методическое пособие / М. Г. Герменчук. – Минск, 2018. – 121 с.
10. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры / Р. М. Алексахин [и др.] ; под общ. ред. Л. А. Ильина, В. А. Губанова. – М. : ИздАТ, 2001. – 752 с.
11. Авдотьин, В. П. Оценка ущерба от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера: монография / В. П. Авдотьин, М. М. Дзыбов, К. П. Самсонов. – М. : ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2012. – 468 с.
12. Обзор состояния радиационной безопасности в Республике Беларусь за 2023 год / Департамент по ядерной и радиационной безопасности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. – Минск : Ковчег, 2024. – 110 с.
13. Обзор состояния ядерной и радиационной безопасности в Республике Беларусь за 2022 год [Электронный ресурс] / Департамент по ядерной и радиационной безопасности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. – Режим доступа: https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/ff6/dfjims13b2tgwl9jkr2j1bw61tuosq/OBZOR_final.pdf. – Дата доступа: 27.05.2024.
14. Герменчук, М. Г. Ретроспективная оценка и моделирование радиоактивного загрязнения территории Республики Беларусь в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС / М. Г. Герменчук, В. В. Журавков // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. – 2022. – № 1. – С. 56–67.

References

1. Menedzhment riska. Tekhniki ocenki riska : STB IEC 31010-2022. – Vved. 01.08.2023. – Minsk : Gosstandart, 2023. – 116 s.
2. Germenchuk, M. G. Osnovnyye mekhanizmy upravleniya riskami v sfere radiacionnoy bezopasnosti i monitoring okruzhayushchej sredy / M. G. Germenchuk, N. N. Cybul'ko // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2024. – № 1 (133). – S. 160–168. – <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2024-133-1-160-168>.

3. Rukovodyashchie principy monitoringa i ocenki transgranichnyh ozer. Rabochaya grupa Evropejskoj ekonomicheskoj komissii po monitoringu i ocenke [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: https://unece.org/DAM/env/water/publications/assessment/Lakesguidelines_A_B_russian.pdf. – Data dostupa: 15.02.2024.
4. Germenchuk, M. G. Radiacionnyj monitoring okruzhayushchej sredy: uchebnoe posobie / M. G. Germenchuk. – Minsk : Vyshejschaya shkola, 2021. – 278 s.
5. Germenchuk, M. G., Nauchnye osnovy radiacionnogo monitoringa okruzhayushchej sredy i rol' gidrometeorologicheskoy sluzhby v ego organizacii na primere katastrofy na CHAES / M. G. Germenchuk, O. M. Zhukova // Ekologicheskij vestnik. – Minsk : MGEI im. A. D. Saharova BGU. – 2014. – № 4. – S. 12–25.
6. Obshchie polozheniya obespecheniya bezopasnosti atomnyh stancij (OPB-88/97). NP-001-97 (Utv. postanovleniem Gosatomnadzora Rossii ot 14 noyabrya 1997 g. № 9) [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=97305>. – Data dostupa 30.05.2024.
7. Atlas zagryazneniya Evropy ceziem posle CHernobyl'skoj avarii: sbornik kart / M. G. Germenchuk [i dr.] ; pod obshch. red. YU. A. Izraelya. – Lyuksemburg : Lyuksemburgskoe byuro dlya oficial'nyh izdanij evropejskih soobshchestv, 1998. – 65 s.
8. Atlas sovremennyh i prognoznyh aspektov posledstvij avarii CHernobyl'skoj AES na postradavshih territoriyah Rossii i Belarusi: sbornik kart / M. G. Germenchuk [i dr.] ; pod red. YU. A. Izraelya, I. M. Bogdevicha. – Minsk : Belkartografiya, 2009. – 135 s.
9. Germenchuk, M. G. Upravlenie sistemoy radiacionnogo monitoringa okruzhayushchej sredy : uchebno-metodicheskoe posobie / M. G. Germenchuk. – Minsk, 2018. – 121 c.
10. Krupnye radiacionnye avarii: posledstviya i zashchitnye mery / R. M. Aleksahin [i dr.] ; pod obshch. red. L. A. Il'ina, V. A. Gubanova. – M. : Izdat, 2001. – 752 s.
11. Avdot'in, V. P. Ocenka ushcherba ot chrezvychajnyh situacij prirodnoho i tekhnogennogo haraktera: monografiya / V. P. Avdot'in, M. M. Dzybov, K. P. Samsonov. – M. : FGBU VNII GOCHS (FC), 2012. – 468 s.
12. Obzor sostoyaniya radiacionnoj bezopasnosti v Respublike Belarus' za 2023 god / Departament po yadernoj i radiacionnoj bezopasnosti Ministerstva po chrezvychajnym situacijam Respubliki Belarus'. – Minsk : Kovcheg, 2024. – 110 c.
13. Obzor sostoyaniya yadernoj i radiacionnoj bezopasnosti v Respublike Belarus' za 2022 god [Elektronnyj resurs] / Departament po yadernoj i radiacionnoj bezopasnosti Ministerstva po chrezvychajnym situacijam Respubliki Belarus'. – Rezhim dostupa: https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/ff6/dfjims13b2tgwl9jjkrc2j1bw61tuosq/OBZOR_final.pdf. – Data dostupa: 27.05.2024.
14. Germenchuk, M. G. Retrospektivnaya ocenka i modelirovanie radioaktivnogo zagryazneniya territorii Respubliki Belarus' v rezul'tate katastrofy na CHernobyl'skoj AES / M. G. Germenchuk, V. V. Zhuravkov // Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya. – 2022. – № 1. – S. 56–67.

Материал поступил 06.06.2024, одобрен 20.06.2024, принят к публикации 25.06.2024