

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-3-74-82>

УДК 621.039.5:502.3:614.876

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОАКТИВНЫХ ВЫБРОСОВ АЭС С РАЗНЫМИ ТИПАМИ РЕАКТОРОВ ПРИ ШТАТНОМ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ И ДЛЯ СЦЕНАРИЕВ ПРОЕКТНЫХ И ЗАПРОЕКТНЫХ АВАРИЙ

М. К. Мукужева^{1*}, С. И. Спиридонов², Р. А. Микаилова²

¹ РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Астана, Казахстан

² НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ, Москва, Россия

* E-mail для контактов: mukusheva@nnc.kz

Выполнен системный анализ атмосферных выбросов российских АЭС с разными типами реакторов при штатном функционировании, а также выбросов для сценариев проектных и запроектных аварий. На основе изучения многолетних данных, определены основные радионуклиды – вкладчики в суммарную активность. Проанализирован состав выбросов при постулируемых авариях на кипящих водо-водяных реакторах (ВВР) и реакторах под давлением (РВР). Полученные результаты рассматриваются в качестве исходных данных для расчета дозовой нагрузки на население от выбросов АЭС и формирования перечней основных дозообразующих радионуклидов. Необходимыми компонентами таких расчетов являются модели, параметризованные на основе региональных данных. Ранжирование в системе “радионуклид – компонент окружающей среды” рассматривается в качестве важного этапа при разработке регламента радиоэкологического мониторинга зоны расположения АЭС.

Ключевые слова: АЭС, реакторные установки, атмосферные выбросы, аварийные сценарии, доза облучения населения, радионуклиды, радиоэкологический мониторинг.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из условий развития ядерной энергетики, наряду с экономической конкурентоспособностью, полным использованием сырьевого потенциала, технологической поддержкой режима нераспространения, является ее экологическая приемлемость. Предприятия ядерного топливного цикла оказывают многофакторное воздействие на окружающую среду, однако повышенное внимание общественности приковано к радиационному фактору, специфичному для ядерного энергопроизводства [1].

В Санитарных правилах проектирования и эксплуатации атомных электростанций (СП АС-03) установлены квоты на облучение населения от радиоактивных выбросов и сбросов АЭС [2]. Дозовая квота для газоаэрозольных выбросов действующей атомной электростанции составляет 200 мкЗв/год, для строящейся или проектируемой АЭС – 50 мкЗв/год. В качестве нижней границы дозы облучения населения в режиме нормальной эксплуатации АЭС задано значение 10 мкЗв в год.

Для адекватной оценки соблюдения указанных дозовых пределов необходимо рассчитать дозы облучения населения с использованием:

- исходных данных, характеризующих активности радионуклидов в составе выбросов;
- миграционно-дозиметрических моделей, при разработке которых учитываются особенности дозообразующих радионуклидов;
- совокупности метеорологических и радиоэкологических параметров, отражающих специфику региона расположения АЭС.

Следует подчеркнуть, что оценка суммарных доз облучения населения и обоснованное сопоставление

этих показателей с дозовыми пределами возможно только в том случае, если исходные данные включают основные дозообразующие радионуклиды. Различия в данных по составу атмосферных выбросов, может оказать существенное влияние на результаты оценок. Так, для Ростовской АЭС расчет по данным, характеризующих выбросы 2007 г., показал, что наибольший вклад в дозовую нагрузку вносил пероральный путь облучения, а по данным 2011 г. – облако выброса [3]. Основные дозообразующие радионуклиды в указанные годы – ¹³¹I и ¹³⁵Xe соответственно.

В нормативном документе [2] в перечень контролируемых радионуклидов, определяющих дозовую нагрузку, включены только ¹³¹I, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co и суммарное количество инертных радиоактивных газов (ИРГ). В методике [4] представлен перечень из 15 радионуклидов (³H, ¹⁴C, ²⁴Na, ⁴¹Ar, ⁵⁴Mn, ⁶⁰Co, ^{85m}Kr, ⁸⁷Kr, ⁸⁸Kr, ⁹⁰Sr, ¹³¹I, ¹³³Xe, ¹³⁵Xe, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs.), для которых должны устанавливаться предельно-допустимые выбросы.

Вклады отдельных радионуклидов в дозу облучения населения, рассчитанные на основе экспериментов по измерению удельной активности радионуклидов в вентиляционных трубах АЭС, приведены в работе [5]. Согласно этим оценкам составы основных дозообразующих радионуклидов варьируют в зависимости от типов реакторных установок. К основным дозообразующим радионуклидам в подавляющем числе случаев относятся ¹⁴C и ³H.

Радиоэкологическая значимость этих радионуклидов подтверждена в результате расчетов для планируемых выбросов перспективных реакторных установок ВВЭР-1200 и БРЕСТ-ОД-300 [6]. Следует подчеркнуть, что расчеты дозовых нагрузок от ¹⁴C и ³H [5, 6]

проводились с использованием моделей, основанных на допущении о равновесии между радионуклидом и его стабильным изотопом во всех компонентах природной среды [7]. Для более реальной оценки (по сравнению с консервативной) целесообразно учитывать региональные районы питания населения.

При оценке соблюдения дозовых пределов можно использовать не только данные по выбросам радионуклидов в атмосферу, но и результаты радиоэкологического мониторинга (РЭМ) в регионах расположения АЭС. Важным элементом РЭМ является (как и при контроле за атмосферными выбросами) перечень определяемых радионуклидов. Так, в методических указаниях [8] и научных публикациях [9] представлены такие перечни в рамках регламента мониторинга агроэкосистем в зоне воздействия АЭС при штатном режиме эксплуатации и для аварийных ситуаций.

Согласно «штатному» перечню, в почве, продукции растениеводства, кормопроизводства и животноводства следует определять содержание значительного количества радионуклидов – продуктов деления (^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{131}I) и продуктов активации (^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{59}Fe). Кроме того, рекомендуется измерять содержание ^3H в воде в период орошения или лова рыбы. В состав «аварийного» перечня включены ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{131}I , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{144}Ce , ^{140}Ba , ^{140}La , ^3H (в воде и рыбе), а также ^{90}Y – дочерний изотоп ^{90}Sr . Необходимо отметить, что совокупности контролируемых в ходе РЭМ радионуклидов [8, 9], рекомендованы для АЭС с любыми типами реакторов.

Для оптимизации регламента РЭМ целесообразно сформировать перечни основных дозообразующих радионуклидов стационарного происхождения, содержащихся в компонентах окружающей среды (ОС). В работе [6] представлены результаты радиоэкологического ранжирования радионуклидов, накопленных в компонентах ОС (виды агропродукции, воздух, почва). Так, основными вкладчиками в дозовую нагрузку на население от выбросов реактора ВВЭР-1200 являются ^{14}C и ^3H , содержащиеся в продукции растениеводства и животноводства. Результаты расчета парциальных дозовых нагрузок и ранжирование в системе «радионуклид – компонент ОС» будут зависеть от типа реакторной установки, определяющей состав радиоактивных выбросов.

При расчетах [6] в качестве исходных данных рассматривались плановые выбросы атомных электростанций. Однако, для функционирующих АЭС активности отдельных радионуклидов в фактических выбросах могут отличаться от плановых значений. Это отличие может повлиять на результат оценки дозовой нагрузки за счет эффекта накопления долгоживущих радионуклидов в почве в течение длительного времени работы АЭС. По этой причине представляет интерес расчет динамики дозовой нагрузки на население на основе данных фактических выбросов.

Таким образом, на основе краткого обзора можно сделать вывод о необходимости системных расчетных оценок, нацеленных на выявление основных дозообразующих радионуклидов в составе выбросов различных АЭС, и формирование перечней изотопов, определяемых в ходе мониторинга. Важным элементом расчетов являются полновесные исходные данные по выбросам АЭС.

РАДИОАКТИВНЫЕ ВЫБРОСЫ ПРИ ШТАТНОМ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ АЭС

Анализ данных о фактических радиоактивных выбросах российских АЭС за 20-летний период выполнен с использованием литературных источников, характеризующих радиационную обстановку на территории России и сопредельных государств ([10, 11] и другие аналогичные публикации). В составах выбросов в период с 2002 г. по 2021 г. зафиксированы радионуклиды, образовавшиеся в процессе ядерного деления и продукты активации – ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^3H , ^{14}C , ^{41}Ar , ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{133}Xe , ^{135}Xe , ^{135m}Xe , ^{138}Xe , ^{85m}Kr , ^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{58}Co , ^{95}Zr , ^{110m}Ag , ^{133}I , ^{140}Ba , ^{65}Zn , ^{124}Sb , ^{24}Na и ИРГ.

Следует отметить, что ^{60}Co , ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs и ИРГ детектировались на всех АЭС в течение всего рассматриваемого периода (2002–2021 гг.). В качестве примера, на рисунке 1 представлена динамика активности годовых выбросов ^{131}I . Количество контролируемых радионуклидов увеличилось после 2015 г. Так, тритий детектируется на Балаковской АЭС с 2015 г., а на других АЭС – с 2018 г. (рисунок 2). С 2018 г. ^{14}C детектируется на Ленинградской, Нововоронежской и Смоленской АЭС, а с 2020 г. – на всех атомных станциях (рисунок 3).

Динамика контроля ^{90}Sr в выбросах российских АЭС носит «противоположный характер» по отношению к динамике контроля за активностью ^3H и ^{14}C . Этот радионуклид детектировался на некоторых станциях в период 2002–2004 гг. и в 2019 г. на Белоярской АЭС. В настоящее время ^{90}Sr не подлежит контролю ни на одной российской АЭС.

Инертные радиоактивные газы в выбросах в основном характеризовались суммарной активностью, но после 2018 г. в [10, 11] представлены значения выбрасываемой активности для отдельных ИРГ. Остальные радионуклиды из представленного выше перечня, кроме ^{124}Sb , также присутствовали в выбросах отдельных станций в разные годы. Изотоп ^{124}Sb регистрировался только на Нововоронежской АЭС с 2018 г.

На основе данных о фактических радиоактивных выбросах российских АЭС за 20-летний период были оценены вклады отдельных радионуклидов в суммарную активность выброса. Эти вклады зависят от характеристик конкретной АЭС (типа реакторной установки и систем очистки) и меняются в течение времени работы станции. Изменение может быть обусловлено не только объективными, но и субъективными причинами, к которым относится коррекция перечня контролируемых радионуклидов.

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОАКТИВНЫХ ВЫБРОСОВ АЭС С РАЗНЫМИ ТИПАМИ РЕАКТОРОВ ПРИ ШТАТНОМ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ И ДЛЯ СЦЕНАРИЕВ ПРОЕКТНЫХ И ЗАПРОЕКТНЫХ АВАРИЙ

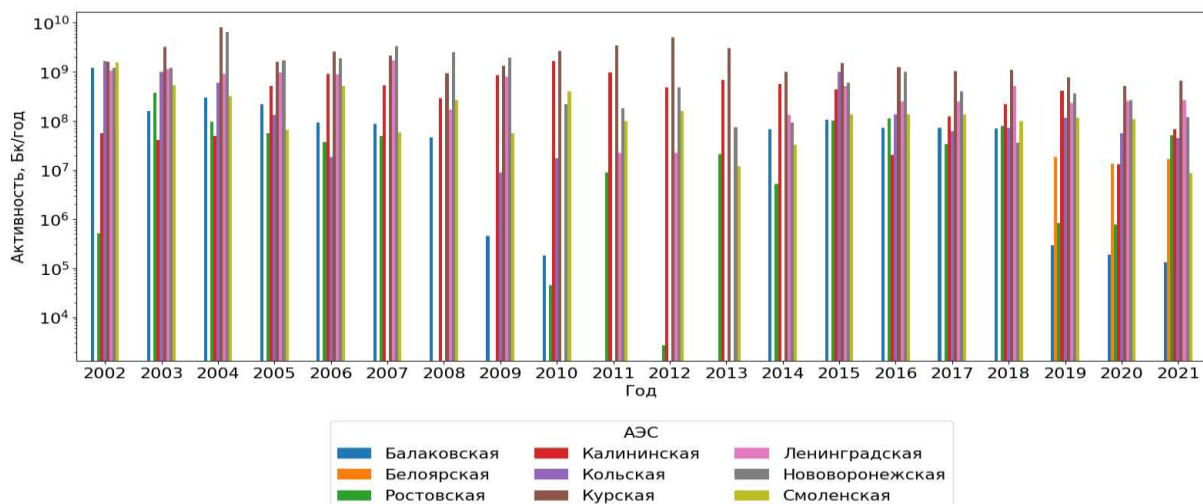


Рисунок 1. Динамика активности ^{131}I в годовых выбросах АЭС

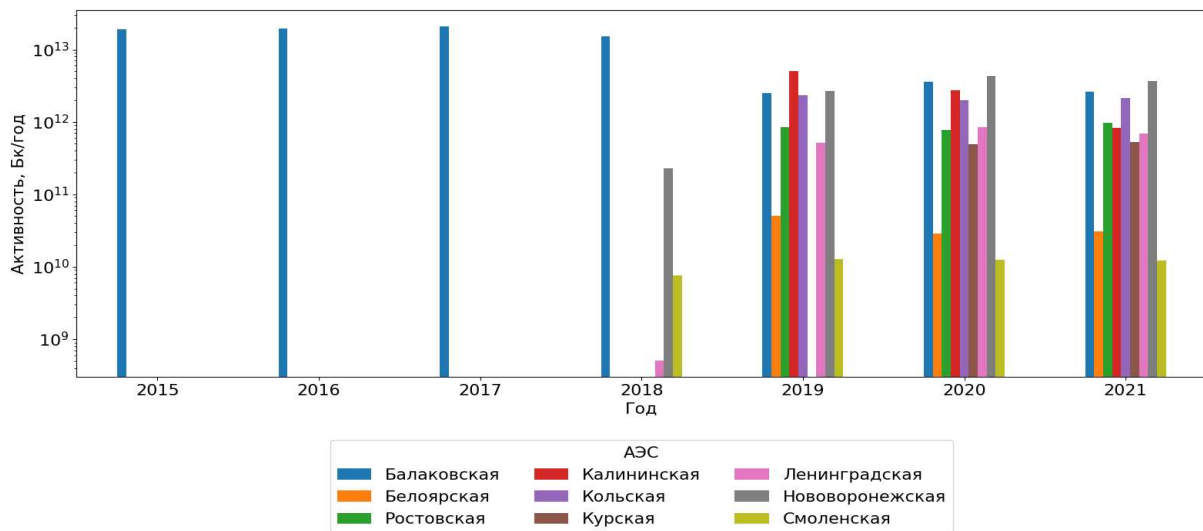


Рисунок 2. Динамика активности ^3H в годовых выбросах АЭС

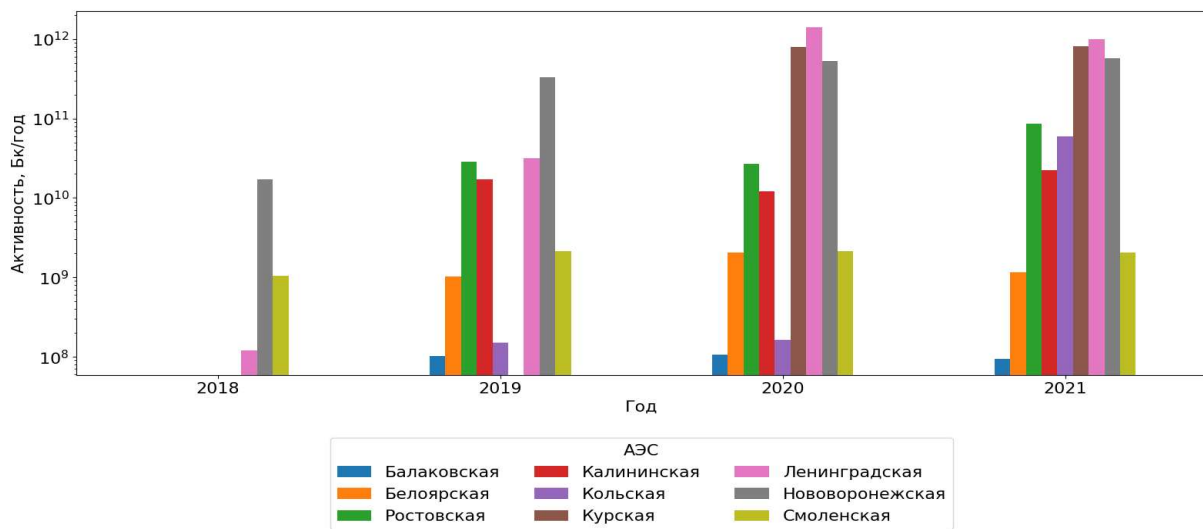


Рисунок 3. Динамика активности ^{14}C в годовых выбросах АЭС

**АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОАКТИВНЫХ ВЫБРОСОВ АЭС С РАЗНЫМИ ТИПАМИ РЕАКТОРОВ
ПРИ ШТАТНОМ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ И ДЛЯ СЦЕНАРИЕВ ПРОЕКТНЫХ И ЗАПРОЕКТНЫХ АВАРИЙ**

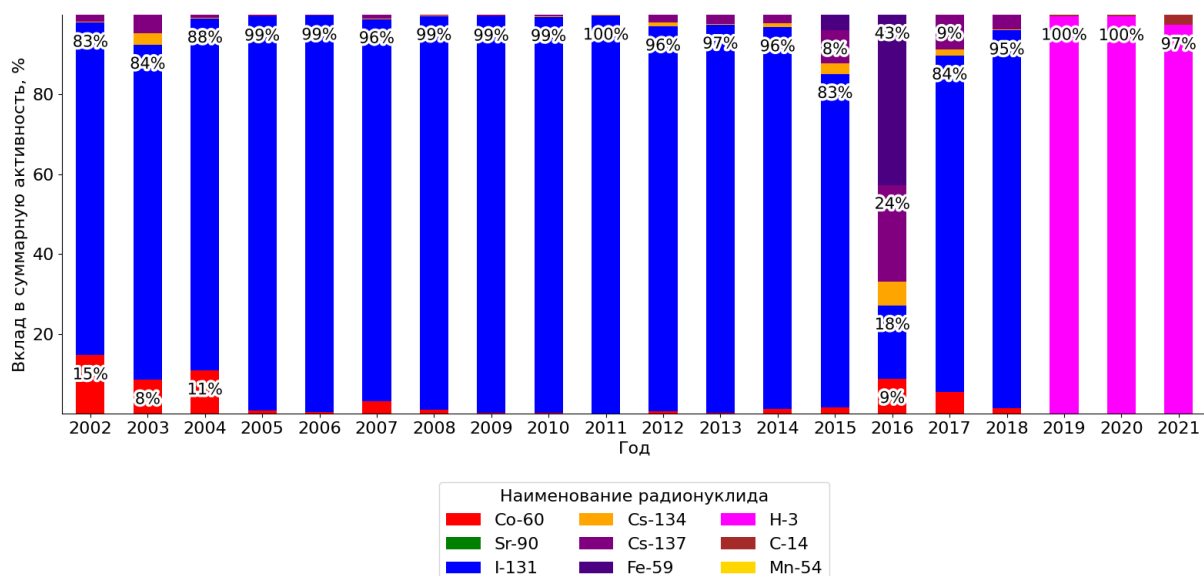


Рисунок 4. Вклады отдельных радионуклидов в суммарную активность выбросов Калининской АЭС (без учета ИРГ)

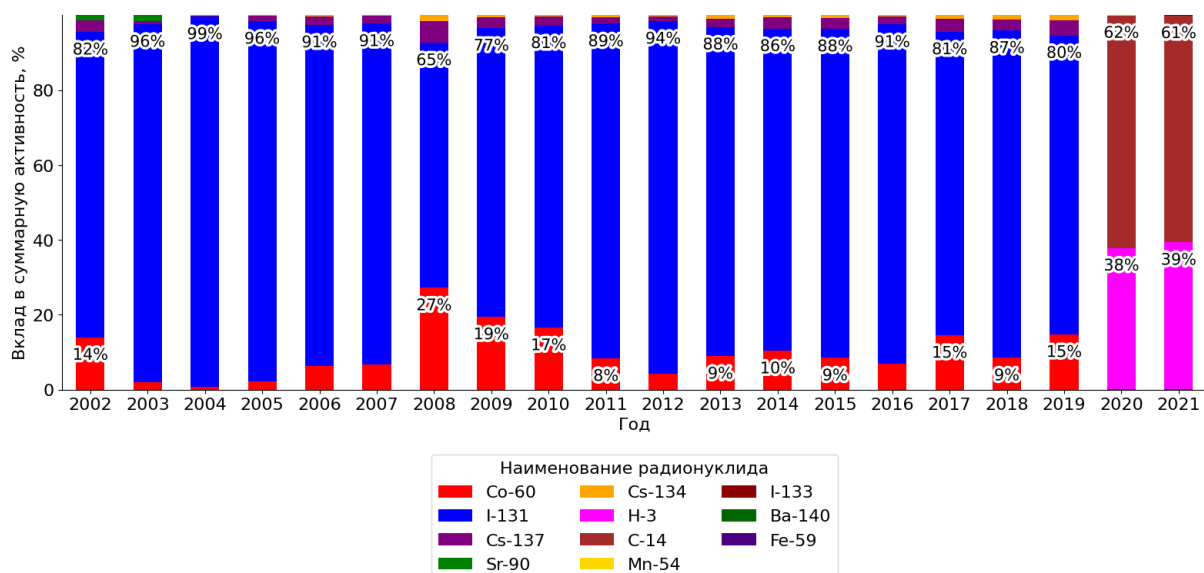


Рисунок 5. Вклады отдельных радионуклидов в суммарную активность выбросов Курской АЭС (без учета ИРГ)

В качестве примера, на рисунках 4 и 5 представлена динамика процентных вкладов радионуклидов в активность годового выброса двух АЭС с реакторами различных типов за минусом активности ИРГ. Такое представление информации целесообразно в силу того, что активность ИРГ существенно превышает активность других радионуклидов, вклады которых будут слабо различимы при графическом представлении.

В период 2002–2017 гг. наибольший вклад в суммарную активность годового выброса Нововоронежской АЭС с реакторами ВВЭР-1000 (без учета ИРГ) вносил ¹³¹I (рисунок 4). Начиная с 2019 г. после кор-

рекции списка контролируемых радионуклидов пре-валирующим изотопом стал ³H.

Аналогичная ситуация наблюдается на Курской АЭС, выбросы которой в 2018 г. и в последующие годы стали формировать ³H и ¹⁴C (рисунок 5). При этом вклад ¹⁴C в суммарную активность выбросов (за исключением ИРГ) является превалирующим (свыше 60%) в силу специфики реакторов РБМК-1000 с графитовым замедлителем.

**РАДИОАКТИВНЫЕ ВЫБРОСЫ ДЛЯ СЦЕНАРИЕВ
ПРОЕКТНЫХ И ЗАПРОЕКТНЫХ АВАРИЙ**

В таблице 1 представлена обобщенная характеристика сценариев постулируемых аварий на российских АЭС с различными типами водо-водяных реак-

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОАКТИВНЫХ ВЫБРОСОВ АЭС С РАЗНЫМИ ТИПАМИ РЕАКТОРОВ ПРИ ШТАТНОМ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ И ДЛЯ СЦЕНАРИЕВ ПРОЕКТНЫХ И ЗАПРОЕКТНЫХ АВАРИЙ

торов [12–15]. По степени тяжести аварии делятся на проектные (ПА), максимальные проектные (МПА) и запроектные (ЗА) аварии. Реакторы различной модификации различаются как по количеству аварийных сценариев, так и по суммарным активностям выбросов.

Сценарии с наибольшими активностями выбросов характерны для реактора ВВЭР-440, с наименьшими активностями – для реактора ВВЭР-1200. Следует подчеркнуть, что вероятности аварийных событий на АЭС с рассматриваемыми реакторными установками являются очень малыми величинами (10^{-7} – 10^{-5} год⁻¹).

На рисунке 6 отражены вклады отдельных радионуклидов в суммарные активности выбросов для различных сценариев постулируемых аварий на АЭС с водо-водяными реакторами. Анализ этих данных показывает, что наибольший вклад в суммарную активность аварийных выбросов вносят ИРГ.

Таблица 1. Общая характеристика аварийных сценариев, разработанных для российских АЭС с различными типами водо-водяных реакторов

Реактор	Сценарии	Суммарная активность, Тбк	Высота выброса, м	Вероятность, год ⁻¹	Кол-во радионуклидов	Тип аварии
ВВЭР-1200	1	$1,15 \cdot 10^2$	30	10^{-6}	18	МПА
	2	$1,49 \cdot 10^4$	30	10^{-7}	40	ЗА
ВВЭР-1000	1	$2,42 \cdot 10^2$	25	10^{-6}	12	МПА
	2	$4,50 \cdot 10^4$	25	10^{-7}	13	ЗА
	3	$5,73 \cdot 10^4$	30	10^{-7}	17	МПА
ВВЭР-440	1	$1,51 \cdot 10^1$	50	$5,20 \cdot 10^{-5}$	17	ПА
	2	$1,98 \cdot 10^1$	50	$5,20 \cdot 10^{-5}$	17	ПА
	3	$8,49 \cdot 10^1$	50	$5,20 \cdot 10^{-5}$	17	ПА
	4	$1,15 \cdot 10^2$	50	$5,20 \cdot 10^{-5}$	17	ПА
	5	$1,48 \cdot 10^4$	120	$5,20 \cdot 10^{-5}$	14	ПА
	6	$2,36 \cdot 10^4$	120	$5,20 \cdot 10^{-5}$	15	ПА
	7	$4,02 \cdot 10^4$	120	$5,20 \cdot 10^{-5}$	15	ПА
	8	$2,12 \cdot 10^3$	120	$5,20 \cdot 10^{-5}$	16	ПА
	9	7,56	120	$5,20 \cdot 10^{-5}$	17	ПА
	10	$1,09 \cdot 10^1$	120	$5,20 \cdot 10^{-5}$	17	ПА
	11	$1,52 \cdot 10^1$	120	$5,20 \cdot 10^{-5}$	17	ПА
	12	$3,67 \cdot 10^3$	120	$5,20 \cdot 10^{-5}$	13	ЗА
	13	$4,39 \cdot 10^4$	120	$5,20 \cdot 10^{-5}$	13	ЗА
	14	$2,85 \cdot 10^4$	120	$5,20 \cdot 10^{-5}$	13	ЗА
	15	$3,46 \cdot 10^5$	120	$5,20 \cdot 10^{-5}$	13	ЗА
	16	$2,27 \cdot 10^5$	120	$5,20 \cdot 10^{-5}$	13	ЗА
	17	$4,59 \cdot 10^5$	40	$5,20 \cdot 10^{-5}$	13	ЗА
	18	$1,18 \cdot 10^7$	40	$5,20 \cdot 10^{-5}$	13	ЗА
	19	$2,62 \cdot 10^3$	40	$5,20 \cdot 10^{-5}$	13	ЗА
	20	$3,59 \cdot 10^4$	40	$5,20 \cdot 10^{-5}$	13	ЗА

Совокупность сценариев запроектных аварий на АЭС с ВВЭР-440 существенным образом отличается от сценариев, разработанных для АЭС с другими типами реакторов. Так, суммарная активность выброса для сценария №18 сопоставима с активностью выбросов при авариях на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима». Вклад ИРГ и изотопов йода согласно этому сценарию составляет 72,2 и 27,5% соответственно.

Сценарии аварий зарубежных реакторов характеризуются как большим количеством радионуклидов в выбросе, так и, в некоторых случаях, более высокой суммарной активностью. В таблице 2 приведены сводные данные по авариям на АЭС с реактором PWR-890 (АЭС Сарри, США), кипящим водяным реактором BWR-1412 (АЭС Пич Боттом, США) и реактором с водой под давлением третьего поколения EPR-1600 (АЭС Хинкли Пойнт Си, Великобритания) [16–18]. Вероятности аварий для реакторов более ранних поколений (10^{-5} год⁻¹ для PWR-890) превышают значение этого показателя для реактора третьего поколения (от 10^{-7} до 10^{-13} год⁻¹ для EPR-1600).

Таблица 2. Основные характеристики аварийных сценариев [16–18]

Реактор	Сценарии	Суммарная активность, Тбк	Высота выброса, м	Вероятность, год ⁻¹	Кол-во радионуклидов
PWR-890	1	$7,51 \cdot 10^6$	8,4	$1,0 \cdot 10^{-5}$ – $2,0 \cdot 10^{-5}$	69
	2	$7,33 \cdot 10^6$	8,4	$1,0 \cdot 10^{-6}$ – $2,0 \cdot 10^{-6}$	69
	3	$1,38 \cdot 10^6$	24,6	$4,0 \cdot 10^{-7}$	69
	4	$5,79 \cdot 10^6$	24,6	$4,0 \cdot 10^{-7}$	69
BWR-1412	1	$1,76 \cdot 10^7$	39,6	$3,0 \cdot 10^{-6}$	67
	2	$1,74 \cdot 10^7$	39,6	$3,0 \cdot 10^{-7}$	67
	3	$2,38 \cdot 10^7$	39,6	$3,0 \cdot 10^{-7}$	67
EPR-1600	1	$5,70 \cdot 10^4$	34,7	$1,49 \cdot 10^{-7}$	54
	2	$1,90 \cdot 10^5$	60,7	$4,84 \cdot 10^{-7}$	54
	3	$2,12 \cdot 10^7$	35,7	$8,06 \cdot 10^{-12}$	54
	4	$2,23 \cdot 10^7$	35,7	$5,84 \cdot 10^{-12}$	54
	5	$2,18 \cdot 10^7$	35,7	$1,02 \cdot 10^{-8}$	54
	6	$2,37 \cdot 10^7$	35,7	$6,98 \cdot 10^{-9}$	54
	7	$2,06 \cdot 10^7$	35,7	$2,67 \cdot 10^{-11}$	54
	8	$2,11 \cdot 10^7$	35,7	$8,37 \cdot 10^{-12}$	54
	9	$2,07 \cdot 10^7$	35,7	$1,23 \cdot 10^{-9}$	54
	10	$2,16 \cdot 10^7$	35,7	$1,09 \cdot 10^{-9}$	54
	11	$1,58 \cdot 10^7$	35,7	$6,51 \cdot 10^{-13}$	54
	12	$2,02 \cdot 10^7$	35,7	$3,96 \cdot 10^{-11}$	54
	13	$2,02 \cdot 10^7$	35,7	$1,27 \cdot 10^{-9}$	54
	14	$2,02 \cdot 10^7$	35,7	$3,29 \cdot 10^{-8}$	54
	15	$2,65 \cdot 10^6$	24,7	$4,14 \cdot 10^{-9}$	54
	16	$1,11 \cdot 10^7$	24,7	$5,01 \cdot 10^{-9}$	54
	17	$1,04 \cdot 10^8$	10	$3,83 \cdot 10^{-9}$	54

**АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОАКТИВНЫХ ВЫБРОСОВ АЭС С РАЗНЫМИ ТИПАМИ РЕАКТОРОВ
ПРИ ШТАТНОМ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ И ДЛЯ СЦЕНАРИЕВ ПРОЕКТНЫХ И ЗАПРОЕКТНЫХ АВАРИЙ**

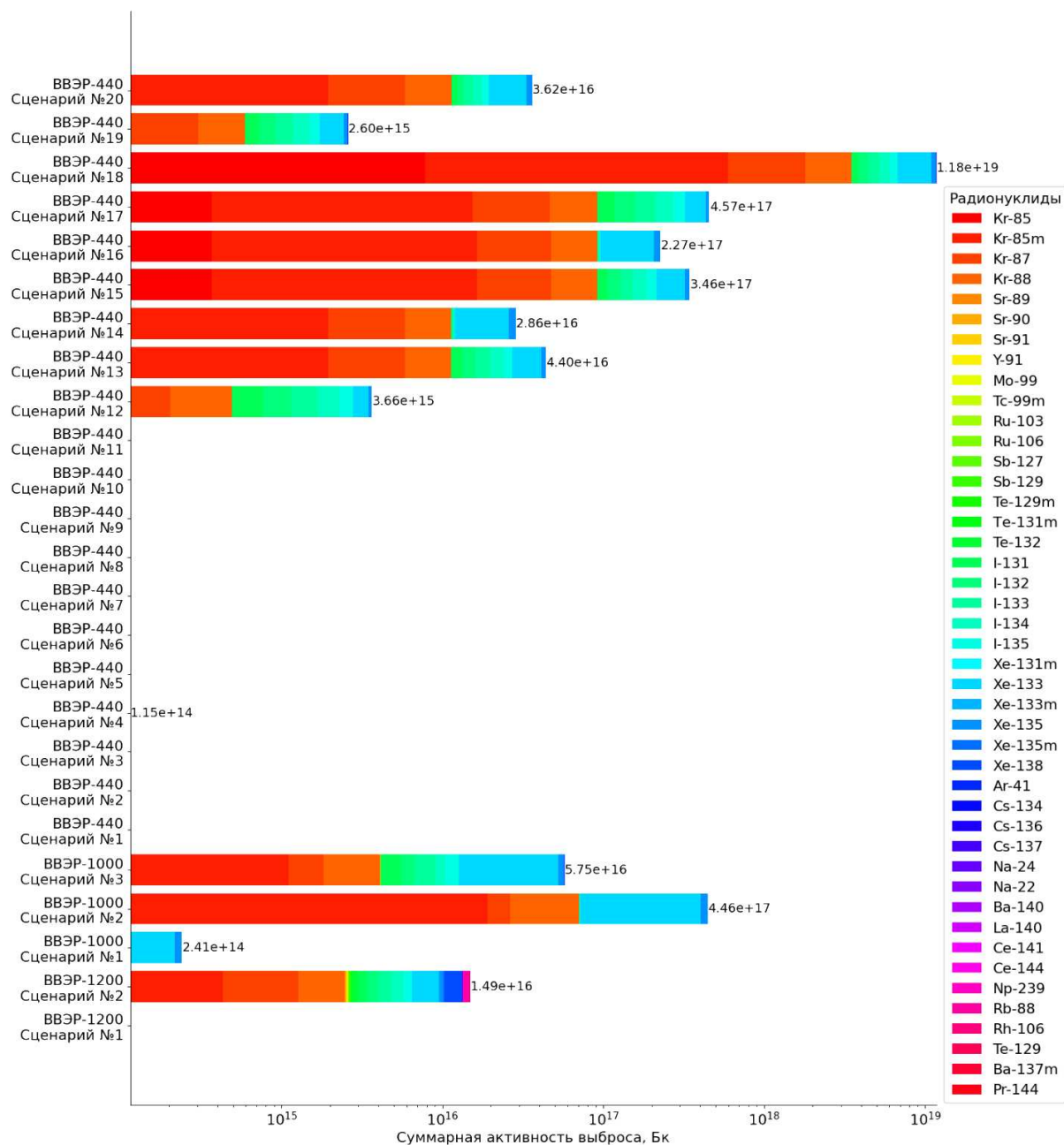


Рисунок 6. Вклады отдельных радионуклидов в суммарные активности выбросов для различных сценариев постулируемых аварий на АЭС с водо-водяными реакторами

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе выполнено обоснование необходимости радиоэкологического ранжирования радионуклидов, выбрасываемых АЭС, для определения основных дозообразующих изотопов. Результаты ранжирования являются основой формирования перечней радионуклидов, контролируемых в ходе радиоэкологического мониторинга. Согласно [9], регламенты РЭМ разрабатываются для штатного режима эксплуатации АЭС и для случая потенциальных радиационных аварий. Расчетные оценки во всех случаях должны базироваться на полновесных исходных

данных, характеризующих активности поступающих в атмосферу радионуклидов.

Выполнен системный анализ атмосферных выбросов функционирующих российских АЭС с разными типами реакторов и определены основные радионуклиды – вкладчики в суммарную активность. Проведен обзор характеристик выбросов при проектных и запроектных авариях на реакторах «линейки» ВВЭР, а также при постулируемых авариях на АЭС с реакторами ВВР и РВР.

При разработке регламента РЭМ целесообразно опираться на результаты ранжирования в системе

«радионуклид – компонент ОС», основанного на расчете парциальных дозовых нагрузок. Необходимыми составляющими таких расчетов, кроме исходных данных по выбросам, являются модели [19], параметризованные на основе региональной информации. Для радиоэкологически значимых радионуклидов ^3H и ^{14}C целесообразно использовать расчетные модули, учитывающие региональные особенности в отличие от подхода, обеспечивающего консервативную оценку [7].

Финансирование

Данные исследования финансировались Министерством энергетики Республики Казахстан в рамках научно-технической программы «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» (ИРН – BR24792713)

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексахин Р.М. Актуальные экологические проблемы ядерной энергетики // Атомная энергия. – 2013. – Т. 114. – Вып. 5. – С. 243–249.
2. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АС-03). Санитарные правила и гигиенические нормативы СанПин 2.6.1.24-03. М.: Минздрав России. – 2003. – 41 с.
3. Шарпан Л.А., Карпенко Е.И., Спиридонов С.И. Оценка дозы облучения населения в результате атмосферных выбросов Ростовской АЭС // Атомная энергия. – 2013. – Т. 115. – Вып. 3. – С. 163–166.
4. Разработка и установление нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ атомных станций в атмосферный воздух. Методика. МТ 1.2.2.15.1176-2016. АО «Концерн Росэнергоатом». – 2016. – 76 с.
5. Vasyanovich M.E., Ekidin A.A., Vasilyev A.V., Kryshev A.I., Kosykh I.V., Kapustin I.A. Determination of radionuclide composition of the Russian NPPs atmospheric releases and dose assessment to population // Journal of Environmental Radioactivity. – 2019. – Vol. 208–209. – P. 106006.
6. Спиридонов С.И., Микаилова Р.А., Нуштаева В.Э. К вопросу об оценке соблюдения квоты на облучение населения от газоаerosольных выбросов АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2021, – Т. 61. – № 6. – С. 667–673.
7. Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment. Saf. Rep. Ser. No. 19. Vienna: IAEA. – 2001. – 229 p.
8. Организация государственного радиоэкологического мониторинга агроэкосистем в зоне воздействия радиационно-опасных объектов. Методические указания. МУ 13.5.13-00. М.: РАСХН. – 2005. – 35 с.
9. Мониторинг природных и аграрных экосистем в районах расположения атомных электростанций: Труды ФГБНУ ВНИИРАЭ. Выпуск 3 / Под ред. проф. С.В. Фесенко. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ. – 2020. – 170 с.
10. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2020 году. Ежегодник / Под ред. В.М. Шершакова, В.Г. Булгакова, С.М. Вакуловского и др. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». – 2021. – 332 с.
11. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2021 году. Ежегодник / Под ред. В.М. Шершакова, В.Г. Булгакова, С.М. Вакуловского и др. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». – 2022. – 342 с.
12. Ehrhardt J., Weiss A. Rodos: Decision support system for off-site nuclear emergency management in Europe. Report EUR 19144, ISBN No.92-828-9773-7. – 2000. – P. 259.
13. БЕЛНИПИЭНЕРГОПРОМ. Обоснование инвестирования в строительство атомной электростанции в Республике Беларусь. Книга 11. Оценка воздействия на окружающую среду. 1588-ПЗ-ОИ4. Часть 8. Отчёт об ОВОС. Часть 8.3. Оценка воздействия АЭС на окружающую среду. – 2010. – 137 с.
14. БЕЛНИПИЭНЕРГОПРОМ. Обоснование инвестирования в строительство атомной электростанции в Республике Беларусь. Этап 4. Оценка воздействия на окружающую среду. 1588 – ПЗ – ОИ4. КНИГА 4. Раздел 9. Характеристика окружающей среды и оценка воздействий на неё БелАЭС. – 2009. – 209 с.
15. СПБАЭП. Оценка воздействия на окружающую среду. Том 1. Книга 2. БЛ.4-0-0-ОВОС-001/2. Санкт-Петербург. – 2012. – 423 с.
16. State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses Project Volume 2: Surry Integrated Analysis (NUREG/CR-7110, Volume 2, Revision 1). Office of Nuclear Regulatory Research. – 2013.
17. State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses Project Volume 1: Peach Bottom Integrated Analysis (NUREG/CR-7110, Volume 1, Revision 1). Office of Nuclear Regulatory Research. – 2013.
18. Hinkley Point C Pre-Construction Safety Report. NNB Generation Company Limited, United Kingdom. – 2012.
19. Мукушева М.К., Спиридонов С.И., Микаилова Р.А., Топорова А. В. Сравнительный анализ программных средств для прогнозирования радиоэкологических последствий штатных и аварийных выбросов АЭС для населения // Вестник НЯЦ РК. – 2024. – Вып. 1 (97). – С. 89 – 94. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-1-89-95>

REFERENCES

1. Aleksakhin R.M. Aktual'nye ekologicheskie problemy yadernoy energetiki // Atomnaya energiya. – 2013. – Vol. 114. – Issue 5. – P. 243–249.
2. Sanitarnye pravila proektirovaniya i ekspluatatsii atomnykh stantsiy (SP AS-03). Sanitarnye pravila i gigienicheskie normativy SanPin 2.6.1.24-03. Moscow: Minzdrav Rossii. – 2003. – 41 p.
3. Sharpan L.A., Karpenko E.I., Spiridonov S.I. Otsenka dozy oblucheniya naseleniya v rezul'tate atmosferykh vybrosov Rostovskoy AES // Atomnaya energiya. – 2013. – Vol. 115. – Issue 3. – P. 163–166.
4. Razrabotka i ustanovlenie normativov predel'no dopustimyykh vybrosov radioaktivnykh veshchestv atomnykh stantsiy v atmosferynyy vozdukh. Metodika. МТ 1.2.2.15.1176-2016. АО “Kontsern Rosenergoatom”. – 2016. – 76 p.
5. Vasyanovich M.E., Ekidin A.A., Vasilyev A.V., Kryshev A.I., Kosykh I.V., Kapustin I.A. Determination of radionuclide composition of the Russian NPPs atmospheric releases and dose assessment to population // Journal of

- Environmental Radioactivity. – 2019. – Vol. 208–209. – P. 106006.
6. Spiridonov S.I., Mikailova R.A., Nushtaeva V.E. K voprosu ob otsenke soblyudeniya kvoty na obluchenie naseleniya ot gazoerozol'nykh vybrosov AES // Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya. – 2021, –Vol. 61. – No. 6. – P. 667–673.
 7. Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment. Saf. Rep. Ser. No. 19. Vienna: IAEA. – 2001. – 229 p.
 8. Organizatsiya gosudarstvennogo radioekologicheskogo monitoringa agroekosistem v zone vozdeystviya radiatsionno-opasnykh ob"ektov. Metodicheskie ukazaniya. MU 13.5.13-00. Moscow: RASKhN. – 2005. – 35 p.
 9. Monitoring prirodnykh i agrarnykh ekosistem v rayonakh raspolozheniya atomnykh elektrostantsiy: Trudy FGBNU VNIIRAE. Vypusk 3 / Pod. red. prof. S.V. Fesenko. Obninsk: FGBNU VNIIRAE. – 2020. – 170 p.
 10. Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nykh gosudarstv v 2020 godu. Ezhegodnik / Pod red. V.M. Shershakova, V.G. Bulgakova, S.M. Vakulovskogo i dr. Obninsk: FGBU “VNIIGMI-MTsD”. – 2021. – 332 p.
 11. Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nykh gosudarstv v 2021 godu. Ezhegodnik / Pod red. V.M. Shershakova, V.G. Bulgakova, S.M. Vakulovskogo i dr. Obninsk: FGBU “VNIIGMI-MTsD”. – 2022. – 342 p.
 12. Ehrhardt J., Weiss A. Rodos: Decision support system for off-site nuclear emergency management in Europe. Report EUR 19144, ISBN No.92-828-9773-7. – 2000. – P. 259.
 13. BELNIPIENERGOPROM. Obosnovanie investirovaniya v stroitel'stvo atomnoy elektrostantsii v Respublike Belarus'. Kniga 11. Otsenka vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu. 1588-PZ-OI4. Chast' 8. Otchet ob OVOS. Chast' 8.3. Otsenka vozdeystviya AES na okruzhayushchuyu sredu. – 2010. – 137 p.
 14. BELNIPIENERGOPROM. Obosnovanie investirovaniya v stroitel'stvo atomnoy elektrostantsii v Respublike Belarus'. Etap 4. Otsenka vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu. 1588 – PZ – OI4. KNIGA 4. Razdel 9. Kharakteristika okruzhayushchey sredy i otsenka vozdeystviy na nee BelAES. – 2009. – 209 p.
 15. SPbAEP. Otsenka vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu. Tom 1. Kniga 2. BL.4-0-0-OVOS-001/2. Sankt-Peterburg. – 2012. – 423 p.
 16. State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses Project Volume 2: Surry Integrated Analysis (NUREG/CR-7110, Volume 2, Revision 1). Office of Nuclear Regulatory Research. – 2013.
 17. State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses Project Volume 1: Peach Bottom Integrated Analysis (NUREG/CR-7110, Volume 1, Revision 1). Office of Nuclear Regulatory Research. – 2013.
 18. Hinkley Point C Pre-Construction Safety Report. NNB Generation Company Limited, United Kingdom. – 2012.
 19. Mukusheva M.K., Spiridonov S.I., Mikailova R.A., Toporova A. V. Comparative Analysis of Software Tools to Predict the Radioecological Consequences after Routine and Accidental Emissions by NPP for the Population // NNC RK Bulletin. – 2024. – Issue 1 (97). – P. 89 – 94. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-1-89-95>

ӘРТҮРЛІ ТИПТІ РЕАКТОРЛАРДАҒЫ АЭС-тің ШТАТТЫҚ ЖҰМЫС ІСТЕУ КЕЗІНДЕГІ, ЖОБАЛЫҚ ЖӘНЕ ЖОБАДАН ТЫС АВАРИЯЛАРДЫҢ СЦЕНАРИЙЛЕРІНЕ АРНАЛҒАН РАДИОАКТИВТІ ШЫҒАРЫНДЫЛАРДЫҢ СИПАТТАМАЛАРЫН ТАЛДАУ

М. К. Мүкүшева^{1*}, С. И. Спиридонов², Р. А. Микаилова²

¹ «Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы» РМК, Курчатова, Қазақстан

² «Курчатова институты» ҒЗО – ВНИИРАЭ, Мәскеу, Ресей

* Байланыс үшін E-mail: mukusheva@nnc.kz

Ресейлік әртүрлі типті реакторлардағы АЭС-тің атмосфералық шығарындыларына, сондай-ақ жобалық және жобадан тыс авариялардың сценарийлеріне арналған шығарындыларға жүйелі талдау жасалды. Көп жылғы деректерді зерделеу негізінде жиынтық белсенділікті жинақтайтын негізгі радионуклидтер анықталды. Қайнайтын сумен жұмыс істейтін су реакторларында (BWR) және қысымдағы реакторларда (PWR) постулатталған авариялар кезіндегі шығарындылардың құрамы талданды. Алынған нәтижелер АЭС шығарындыларынан халыққа түсетін дозалық жүктемені есептеу және негізгі доза түзуші радионуклидтердің тізбесін қалыптастыру үшін бастапқы деректер ретінде қаралады. Мұндай есептеулердің қажетті компоненттері – аймақтық мәліметтер негізінде параметрленген модельдер. «Радионуклид – қоршаған орта компоненті» жүйесіндегі саралау АЭС орналасқан аймақтың радиоэкологиялық мониторинг регламентін әзірлеу кезінде маңызды кезең ретінде қарастырылады.

Түйін сөздер: АЭС, реактор қондырғылары, атмосфералық шығарындылар, авариялық сценарийлер, халықтың сәулелену дозасы, радионуклидтер, радиоэкологиялық мониторинг.

**ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF RADIOACTIVE RELEASES FROM NPP
WITH VARIOUS TYPES OF REACTORS DURING NORMAL OPERATION AS WELL
AS FOR THE DESIGN AND BEYOND THE DESIGN BASIS ACCIDENT SCENARIOS**

M. K. Mukusheva^{1*}, S. I. Spiridonov², R. A. Mikailova²

¹ *RSE “National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan”, Kurchatov, Kazakhstan*

² *NRC “Kurchatov Institute” – VNIIRAE, Moscow, Russia*

* *E-mail for contacts: mukusheva@nnc.kz*

System analysis was conducted to examine the atmospheric emissions from Russian nuclear power plants with various types of reactors during normal operation, as well as the emissions for design and beyond-design accident scenarios. Through many years of study, the main radionuclides that contribute to the total activity were identified. The composition of emissions from postulated accidents at the boiling water reactor (BWR) and pressurized water reactor (PWR) has been analyzed. The obtained results are considered as initial data for calculating the dose load on the population from NPP releases and formation of lists of the main dose-forming radionuclides. The necessary components of such calculations are models parameterized on regional data. Ranking in the system “radionuclide – environmental component” is considered as an important stage for developing the Regulation for Environmental Monitoring of the NPP location area.

Keywords: *NPP, reactor facilities, atmospheric emissions, accident scenarios, exposure dose of the population, radionuclides, radioecological monitoring.*