———— ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ —

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ШТАТНЫХ ВЫБРОСОВ АЭС

© 2021 г. А. Н. Переволоцкий^{а,*}, Т. В. Переволоцкая^{а,**}

^аВсероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия *E-mail: Aleks Perevolotsky@mail.ru

**E-mail: forest rad@mail.ru

Поступила в редакцию 05.02.2021 г. После доработки 08.02.2021 г. Принята к публикации 12.03.2021 г.

В статье представлены результаты оценки радиационной обстановки при штатных выбросах атомных станций. Показано снижение активности нормализованных штатных выбросов АЭС с реакторами PWR (отечественный аналог BBЭP) за последние 50 лет. Активность штатных выбросов АЭС с различными типами реакторов за год существенно ниже по сравнению с образованием радионуклидов в окружающей среде вследствие природных процессов и их поступления при глобальных и аварийных выпадениях, а также в результате переработки отработанного ядерного топлива на радиохимических заводах. Спрогнозированы показатели радиационной обстановки в зоне распространения штатных выбросов АЭС на примере Ленинградской АЭС-2. Установлено, что наибольшая объёмная активность радионуклидов в облаке суточного выброса вероятна на удалении 1-2 км от станции. За 60 лет работы АЭС поступление 137 Сs в почву не превысит 6 Бк/м², что почти на два математических порядка меньше по сравнению с его содержанием, обусловленным глобальными выпадениями. В зоне распространения штатного выброса АЭС дополнительное внешнее облучение не превысит 2% относительно естественного радиационного фона.

Ключевые слова: атомные электростанции, штатные радиоактивные выбросы, радионуклиды, активность, мощность амбиентного эквивалента дозы.

DOI: 10.31857/S0869587321070112



ПЕРЕВОЛОЦКИЙ Александр Николаевич — доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории математического моделирования и программно-информационного обеспечения ФГБНУ ВНИИРАЭ. ПЕРЕВОЛОЦКАЯ Татьяна Витальевна кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории математического моделирования и программно-информационного обеспечения ФГБНУ ВНИИРАЭ.

Развитие современной цивилизации сопряжено с увеличением потребления электрической энергии. Одним из эффективных путей её производства служат атомные электростанции (АЭС). Так, согласно данным Института ядерной энергетики (США), в 2019 г. АЭС вырабатывали около 70% всей электроэнергии во Франции, ~50% в Словакии, Украине, Бельгии и Венгрии [1]. В Российской Федерации в 2020 г. доля атомных станций в выработке электроэнергии составляла ~19%, при этом в Европейской части России она достигала 30%, а на северо-западе страны – 37% [2].

Вместе с тем за последние 10 лет в мире сформировались два противоположных взгляда на будущее атомной энергетики: с одной стороны, происходит дальнейшее совершенствование существующих и разработка новых энергоблоков в Китае, Индии и России, а с другой — свёртывание и даже полный отказ от АЭС в Италии, Японии, Бельгии, Германии и Швейцарии. В качестве аргументов противники атомной энергетики называют проблемы переработки и захоронения радиоактивных отходов, поступление техногенных радионуклидов в окружающую среду при нормальной эксплуатации и вследствие аварийных инцидентов на АЭС и других предприятиях ядерного топливного цикла, что способно вызвать дополнительное, сверхфоновое облучение [3, 4].

По этой причине в Российской Федерации проектирование или модернизация предприятий, применяющих ялерные технологии. осуществляется в соответствии с требованиями, установленными Федеральным законом "Об охране окружающей среды". Кроме того, в санитарно-защитной зоне и зоне наблюдения таких предприятий проводится многолетний радиоэкологический мониторинг, в ходе которого определяются содержание радионуклидов при штатных выбросах и сбросах в компонентах природной среды (атмосферный воздух, почва, грунтовые и поверхностные воды, продукты питания), а также мощность амбиентного эквивалента дозы внешнего у-излучения [5–7]. В зоне наблюдения АЭС показатели радиационной обстановки не отличаются от территорий, которые удалены от станций. Так, типичная величина суммарной β-активности радионуклидов в приземном слое воздуха составляет $5-20 \times 10^{-5} \,\mathrm{K/M^3}, {}^{137}\mathrm{Cs} - 2 - 15 \times 10^{-7} \,\mathrm{K/M^3}, {}^{90}\mathrm{Sr} - 10^{-7} \,\mathrm{K/M^3}, {}$ $<4 \times 10^{-8}$ Бк/м³. При этом величина осаждения радиоактивных веществ на земную поверхность не превышает 1.2 Бк/м²·сут. по суммарной β-активности, 0.5 Бк/м² год по ¹³⁷Сs. Поверхностная активность ¹³⁷Cs в почве находится в диапазоне $0.5-1.7 \text{ кБк/м}^2$, то есть на фоновом уровне после глобальных радиоактивных выпадений. Мощность амбиентного эквивалента дозы составляет 70-200 нЗв/ч, соответствуя типичной флуктуации естественного радиационного фона.

Анализируя результаты исследований радиоэкологического мониторинга в зоне наблюдения атомных станций [5–7], можно сделать вывод о крайне низком поступлении радионуклидов (в частности, долгоживущих ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr) в окружающую среду при нормальном режиме эксплуатации АЭС. Соответственно, определить очень малую прибавку их активности к уже существующему, фоновому загрязнению крайне сложно. Ещё сложнее определить приращение мощности дозы внешнего у-излучения при штатных выбросах АЭС, поскольку внешнее облучение в этом случае обусловлено главным образом содержанием естественных радионуклидов в почве, коэффициент вариации их удельной активности может достигать 40% даже в пределах одинаковых подтипов почв [8-10]. Похожая ситуация складывалась на территории, загрязнённой ¹³⁷Cs после аварии на ЧАЭС в 1986 г.: прибавку к мощности дозы

внешнего γ -излучения от чернобыльских выпадений можно достоверно определить только при плотности загрязнения почвы ¹³⁷Cs > 37 кБк/м² [11].

Таким образом, цель нашего исследования – прогнозирование наиболее вероятного содержания радионуклидов при штатном выбросе АЭС с реакторами ВВЭР в приземном слое воздуха, почве и связанной с ним мощности амбиентного эквивалента дозы внешнего γ-излучения. Представляется важным найти ответы на следующие вопросы:

• какова динамика штатных выбросов АЭС в долговременной перспективе;

• как отличается штатный выброс АЭС с различными типами реакторов и какова величина суммарного выброса всех атомных станций;

• каковы прогнозные показатели радиационной обстановки на различных расстояниях от АЭС при штатном режиме её работы;

• насколько штатные выбросы АЭС увеличивают содержание радионуклидов в окружающей среде относительно фонового;

• каковы вероятные дозы внешнего γ-излучения в приземном слое воздуха при штатном выбросе и их соотношение с дозами от естественных и искусственных источников ионизирующей радиации.

Динамика штатных выбросов АЭС. Прежде всего необходимо дать пояснения о генезисе радионуклидов внутри ядерного реактора. Урановое топливо, загружаемое в его активную зону, не представляет существенной радиационной опасности. Например, при массе полной загрузки активной зоны ВВЭР-440 (42 т) суммарная активность урана составляет ~600 ГБк [12]. При работе реактора тепловыделение в его активной зоне происходит за счёт реакции деления ядер урана внутри таблетки диоксида с образованием радиоактивных изотопов – продуктов деления (Xe, Kr, I, Cs и др.). Кроме того, вследствие захвата нейтронов атомными ядрами образуются продукты активации (например, ⁵⁴Mn, ⁵⁵Fe, ⁶⁰Co) и трансурановые элементы Pu, Am, Cm и др. Соответственно, к концу топливной кампании, которая длится примерно три года, суммарная активность вновь образованных радионуклидов достигает 10^{10} ГБк, а тепловыделение от их радиоактивных распадов значительно превышает тепловыделение от реакции деления ядер урана [12].

Штатные радиоактивные выбросы АЭС происходят вследствие диффузии радионуклидов в просвет тепловыделяющего элемента — герметичной циркониевой трубки, содержащей таблетки с диоксидом урана, далее в теплоноситель, внутрь контаймента и защитной оболочки. При этом на пути радионуклидов существует ряд фи-



Рис. 1. Нормализованные штатные выбросы АЭС с реактором PWR, Бк/год на 1 ГВт выработанной электрической мощности [13, 14]

зических барьеров (сама таблетка, тепловылеляюший элемент. теплоноситель I и II контуров. контаймент, защитная оболочка, система очистки воздуха и теплоносителя), способных задерживать радионуклиды [12]. Для снижения штатных выбросов проводится постоянное совершенствование систем очистки теплоносителя и воздуха в помещениях станции, поэтому многолетняя динамика активности основных групп радионуклидов демонстрирует устойчивый тренд снижения [13, 14] (рис. 1). С начала 70-х годов XX в. нормализованный выброс радиоактивных изотопов инертных газов, ¹³¹I и ³H (выброс, нормированный на 1 ГВт электрической мощности) сократился почти на два математических порядка, аэрозолей — примерно в 500 раз (рис. 1).

Штатные выбросы АЭС с различными типами реакторов. Установлено [15], что даже на АЭС с одинаковыми типами реакторов (PWR) активность выбросов может существенно отличаться в зависимости от режимов работы и конструкционных особенностей реакторных установок. Например, годовой нормализованный выброс ⁸⁵Кг находится в диапазоне $1.9 \times 10^8 - 4.9 \times 10^{10}$ Бк/год, а ¹³³Хе – 1.5 × 10¹¹–8.7 × 10¹¹ [15]. При этом общая тенденция — максимальная активность радиоизотопов инертных газов ¹³³Хе (60-80%), ¹³⁵Хе (10-20%), ⁸⁸Kr и ⁸⁵Kr (до 10%), доля остальных обычно не превышает единиц процента [13-15]. В суммарном выбросе радиоизотопов йода доля ¹³¹I и ¹³³I составляет 15–25%, а ¹³⁵I – 25–40%, доля ¹³²I и ¹³⁴I – от 10 до 15% [13]. Суммарная активность радиоактивных аэрозолей в составе штатного выброса АЭС может находиться в диапазоне от 1×10^6 до 1×10^8 Бк/год, при этом наиболее распространённые радионуклиды в их составе – долгоживущие 137 Cs и 60 Co (по 25–30% от общей активности аэрозолей).

Для АЭС с различными типами реакторов при известных величинах выработанной мощности в течение года и нормализованного штатного выброса радионуклидов можно оценить в первом приближении суммарное поступление радиоактивных веществ в атмосферу (табл. 1) [14].

Так. АЭС с конструктивно близкими типами энергоблоков PWR и BWR выработали 90% всей электрической энергии, однако их вклад в состав суммарного выброса относительно невелик: ~10% по ³H, ~30% по ¹³¹I и радиоактивным изотопам инертных газов (ИРГ), 40% по ¹⁴С. Наибольшее количество ИРГ, радиоизотопов йода и аэрозолей поступает в окружающую среду при работе АЭС с реакторами РБМК (LWGR по международной классификации). Казалось бы, величины поступления радионуклидов вследствие работы АЭС достаточно большие, так как исчисляются десятками порядков Бк, однако значительная часть радиоизотопов инертных газов, йода и аэрозолей имеют относительно небольшой период полураспада, исчисляемый сутками и даже часами. Соответственно, за промежуток времени в 10 периодов полураспада происходит практически полное исчезновение такого радионуклида. Вместе с тем в окружающей среде накапливаются долгоживущие радионуклиды (³H, ¹⁴C, ⁸⁵Kr, ¹³⁷Cs).

Полученные данные по штатным радиоактивным выбросам АЭС можно сопоставить с величиной активности тех же радионуклидов, поступивших в окружающую среду при испытаниях ядерного оружия или вследствие аварийных ситуаций, а также с образованными в результате

ПЕРЕВОЛОЦКИЙ, ПЕРЕВОЛОЦКАЯ

АЭС	Выработанная мощность, ГВт	Нормализованный выброс, Бк/ГВт электрической мощности					
		ИРГ	³ H	¹³¹ I	¹⁴ C	Аэрозоли	
Выброс по основным типам станций							
PWR	205	5.8×10^{12}	1.5×10^{12}	8.0×10^{7}	8.3×10^{10}	3.6×10^{7}	
BWR	63.7	1.8×10^{13}	1.3×10^{12}	4.2×10^{8}	1.3×10^{11}	1.8×10^{9}	
HWR	17.1	3.5×10^{13}	2.0×10^{14}	2.3×10^{7}	6.0×10^{11}	1.7×10^{7}	
LWGR	8.15	4.6×10^{14}	2.6×10^{13}	9.9×10^{9}	1.3×10^{12}	2.7×10^{9}	
AGR	5	1.9×10^{13}	4.0×10^{12}	3. 2×10^7	1.4×10^{12}	2.2×10^{7}	
GCR	0.93	1.7×10^{15}	5.0×10^{12}	—	5.5×10^{12}	3.0×10^{8}	
FBR	0.42	4.4×10^{13}	4.9×10^{13}	2.0×10^{8}	1.2×10^{11}	1.4×10^{8}	
Общий выброс							
Сумма	300	8.4×10^{15}	$4.1E \times 10^{15}$	1.2×10^{11}	5.8×10^{13}	1.4×10^{11}	

Таблица 1. Выбросы радионуклидов по типам станций АЭС в 2010 г. [14]

Таблица 2.	Активность	радионуклидов	в окружающей	среде,	обусловленная	различными	источниками п	роис-
хождения,	Бк							

	Равновесная активность в различных средах, обусловленная природными процессами [16, 17]	Поступление	Аварийные выбросы		
Радионуклид		в атмосферу в результате ядерных взрывов (1954–1999) [17]*	ЧАЭС (1986) [18]	Фукусима-Дайичи (2011) [4]	
³ H	1.3×10^{18}	1.9×10^{20}	—	—	
¹⁴ C	1.3×10^{19}	2.1×10^{17}	_	-	
⁸⁵ Kr	$n \times 10^{12}$ (атмосфера)	2.0×10^{18}	3.7×10^{16}	3.2×10^{16}	
⁹⁰ Sr	<i>n</i> × 10 ¹⁶ (литосфера)	6.2×10^{17}	1.1×10^{16}	1.4×10^{14}	
⁸⁹ Sr	-	1.2×10^{20}	3.7×10^{17}	1.3×10^{16}	
¹⁰⁶ Ru	_	1.2×10^{19}	2.6×10^{17}	_	
¹³¹ I	-	6.7×10^{20}	2.9×10^{18}	4×10^{17}	
¹³³ Xe	_	4.4×10^{21}	7.4×10^{18}	1.2×10^{19}	
¹³⁷ Cs	<i>n</i> × 10 ¹⁶ (литосфера)	9.5×10^{17}	9.6×10^{16}	2×10^{16}	
¹⁴⁰ Ba	-	7.6×10^{20}	2.9×10^{17}	_	
¹⁴⁴ Ce	_	3.0×10^{19}	1.5×10^{17}	1.1×10^{13}	

* Общая активность радионуклидов, поступивших в атмосферу за исключением локальных выпадений на полигонах и регионального осаждения, при соотношении примерно 4.7:1 в Северном и Южном полушариях.

природных процессов (табл. 2) [4, 16–18]. Цель такого сравнения – дать представление о масштабах поступления радионуклидов в окружающую среду от различных источников. Один из наиболее существенных источников поступления радионуклидов в глобальном масштабе — испытания ядерного оружия. Проведено 545 ядерных взрывов в атмосфере общей мощностью 440 Мт (эквивалент ядерного взрыва в миллионах тоннах тринитротолуола), из которых 189 Мт выделенной энергии обусловолено реакцией деления тяжёлых ядер, а оставшаяся часть синтезом лёгких [17]. Около 80 взрывов большой мощности (>1 Мт) определили почти 90% энерговыделения с поступлением радионуклидов в стратосферный резервуар и последующим глобальным радиоактивным загрязнением. При этом важны временной и пространственный аспекты поступления радионуклидов в стратосферу [16–18].

Максимумы реализованной мощности пришлись на 1954—1958 гг. (140 Мт) и 1961—1962 гг. (250 Мт). Соответственно, и поступление в эти годы было самым большим. Отметим, что к настоящему времени содержание долгоживущих радионуклидов снизилось (произошло два периода полураспада долгоживущих ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs, пять — ³H) и полностью распались короткоживущие радиоизотопы.

Пространственный аспект заключается в преобладающем количестве атмосферных испытаний большой мощности в верхних слоях атмосферы Северного полушария (~140 Мт энерговыделения), при этом в силу особенностей циркуляции атмосферы примерно 60% радионуклидов выпало в полосе между 30 и 60° с.ш. [17]. В частности, суммарное поступление ⁹⁰Sr в атмосферу составило 6.2 × 10¹⁷ Бк, из которых 4.6 × 10¹⁷ Бк осело в Северном полушарии и 2.6 × 10¹⁷ Бк – в полосе средних широт [17].

Аварийные выбросы характеризовались преимущественным осаждением радионуклидов вблизи источника выброса, хотя часть легколетучих радиоизотопов инертных газов, теллура, йода и цезия внесла вклад в глобальное радиоактивное загрязнение окружающей среды. Например, при аварийных выбросах на ЧАЭС к этой категории выпадений отнесено 40–50% ¹³⁷Cs [18].

Немаловажен и естественный источник образования радионуклидов. Так, ³Н и ¹⁴С образуются при взаимодействии космического излучения с ядрами химических элементов в составе атмосферы. Их равновесная активность в окружающей среде превышает годовой выброс всех АЭС на 3 математических порядка по ³Н и на 6 – по ¹⁴С. Однако наиболее существенным источником образования ³Н послужила реакция синтеза (см. табл. 2).

Многие продукты деления, в том числе 137 Cs и 90 Sr, образуются в литосфере вследствие спонтанных делений ядер урана и их равновесная активность оценивается ~ 10^{16} Бк [16], что сопоставимо с поступлением этих радионуклидов вследствие аварийных выбросов АЭС (см. табл. 2). Однако при спонтанном делении они образуются в лито-

сфере в целом, а при аварийных выпадениях загрязнение носит локальный характер. Вследствие испытаний ядерного оружия в атмосферу поступило ~ 10^{18} Бк 137 Сs и 90 Sr, глобальное радиоактивное загрязнение остаётся достаточно заметным и в настоящее время. Важно отметить, что и аварийное, и глобальное поступление 137 Сs в окружающую среду на 6—7 математических порядков больше по сравнению с годовым штатным выбросом этого радионуклида всеми атомными электростанциями.

Штатный выброс ¹³¹ I примерно на 6-7 математических порядков меньше по сравнению с аварийными и почти на 9 – с поступлением в атмосферу при испытаниях ядерного оружия. Однако аварийные выбросы сопровождались залповым характером поступления радионуклидов (большое количество в ограниченном пространстве), а при ядерных взрывах они были пролонгированными, соответственно, значительная часть радионуклида поступала в верхние слои атмосферы и распадалась до проведения следующих испытаний. Нельзя не упомянуть радиофармацевтические производства в качестве мощного источника поступления радиоизотопов йода. Например, в 2018 г. годовой выброс ¹³¹ I Научно-исследовательским физико-химическим институтом им. Л.Я. Карпова (г. Обнинск) достигал 2.2 · 10¹² Бк, что превышает выброс всех АЭС вместе взятых [6].

Равновесная активность ⁸⁵Кг в атмосфере, обусловленная активацией нейтронами космического излучения природного изотопа ⁸⁴Kr, составляет ~ 10^{12} Бк. Ежегодное поступление ⁸⁵Kr при штатном выбросе АЭС с реакторами ВВЭР можно оценить исходя из доли радионуклида в составе радиоизотопов инертных газов (до 10%) ~8 × 1014 Бк. Однако самый мощный источник поступления этого радионуклида – переработка ядерного топлива: с 1970 по 1997 г. в атмосферу поступило 3.2×10^{21} Бк ⁸⁵Кг, причём треть этой величины в 1995-1997 гг. [17]. Учитывая возрастание доли атомной энергетики в производстве электрической энергии и объёма отработанного ядерного топлива, становится очевидным постоянное увеличение вклада ⁸⁵Кг в суммарную радиоактивность атмосферы.

Прогнозирование радиационной обстановки в зоне распространения штатных выбросов. Работа выполнена на примере Ленинградской АЭС-2 (четыре энергоблока с реакторами ВВЭР-1200) по трём показателям [19–21]:

• объёмная активность радионуклидов выброса в приземном слое воздуха. Этот показатель отражает содержание радионуклидов в атмосфере, позволяет оценить внешнее облучение живых организмов и ингаляционное поступление внутрь организма. Для радиоизотопов инертных газов внешнее облучение из атмосферы — единственный путь радиационного воздействия на биоту, поскольку на поверхность почвы они не осаждаются;

 поверхностная активность радионуклидов в почве определяется осаждением радионуклидов из состава штатного выброса на её поверхность под действием гравитации и вымывания осадками из атмосферы. Соответственно, при штатных выбросах АЭС будет происходить постоянное накопление радионуклидов в почве, определяющее внешнее облучение и миграцию по пищевым цепочкам;

 мощность амбиентного эквивалента дозы, обусловленная внешним γ-излучением радионуклидов из состава выброса, находящихся в воздухе и почве. Она формируется вследствие передачи энергии ионизирующего излучения радионуклидов в окружающую среду и отражает меру радиационного воздействия на биологический объект в поле излучения [19].

Исходными данными для проведения расчётов послужили активности годового проектного выброса ЛАЭС-2 радиоизотопов инертных газов 1.8×10^{15} Бк (из которых $60\% - {}^{133}$ Xe, $17\% - {}^{135}$ Xe, $11 - {}^{88}$ Kr, $5\% - {}^{85m}$ Kr), йода $- 1.94 \times 10^{9}$ Бк ($29\% - {}^{133}$ I, $23\% - {}^{135}$ I, $20\% - {}^{132}$ I, $15\% - {}^{131}$ I и $13\% - {}^{134}$ I), радиоактивных аэрозолей $- 2 \times 10^{8}$ Бк ($59\% - {}^{137}$ Cs, $40\% - {}^{134}$ Cs), 3 H $- 1.5 \times 10^{13}$ Бк [7].

Прогноз объёмной активности в приземном слое воздуха и интенсивность осаждения радионуклидов на земную поверхность оценивались в двух вариантах расчёта с применением гауссовых моделей рассеяния примеси: для суточного выброса — при наиболее вероятных метеорологических характеристиках атмосферы и для годового выброса — при среднемноголетних [19].

Первый вариант расчёта позволил спрогнозировать объёмную активность радионуклидов в приземном слое воздуха и связанную с ней мощность амбиентного эквивалента дозы внешнего уизлучения в облаке суточного выброса при условии неизменности аэрологических характеристик. Данный вариант можно рассматривать как наиболее вероятную и максимальную величину радиационного воздействия. Наиболее вероятные метеоусловия (вероятность реализации 52%) – нейтральное состояние атмосферы (категория устойчивости D, согласно классификации Пасквилла–Гиффорда [19]) при скорости ветра 3 м/с на высоте 10 м [14].

Второй вариант позволяет получить усреднённые за длительный период времени расчётные данные по содержанию радионуклидов в приземном слое воздуха и почве, а также связанные с ними мощности амбиентного эквивалента дозы внешнего γ-излучения. В этом случае можно провести оценки радиационного воздействия за продолжительный период времени. Среднемноголетние аэрологические условия для его реализавключающие совместную ции, частоту повторяемости категорий устойчивости атмосферы и скорости ветра на высоте выброса, а также интенсивность вымывания радионуклидов из приземного слоя воздуха ($\sim 1.2 \times 10^{-6} \, 1/c$), приняты согласно [19]. Расчёты были осуществлены для румба с наибольшей интенсивностью осаждения радионуклидов на земную поверхность, которому соответствовало западное направление ветра. Эффективная высота выброса принята равной геометрической высоте трубы от её основания до устья — 100 м.

Поверхностную активность почвы за 60 лет штатных радиоактивных выбросов АЭС рассчитывали исходя из интенсивности осаждения радионуклидов на земную поверхность в результате сухого осаждения и влажного выведения из атмосферы, а также постоянного очищения вследствие радиоактивного распада и процессов миграции [19, 21, 22].

Мощность амбиентного эквивалента дозы внешнего γ-излучения определяли с применением дозовых коэффициентов для радионуклидов, находящихся в приземном слое воздуха и почве [23].

Результаты расчётов показателей радиационной обстановки при штатном выбросе АЭС. Распределение объёмной активности ³H, ⁸⁵Kr, ¹³³Xe, ¹³¹I и ¹³⁷Cs в приземном слое воздуха в зависимости от расстояния до АЭС приведено на рисунке 2. Концентрацию других радионуклидов можно оценить по вышеприведённым, поскольку штатные выбросы по многим из них сопоставимы. Так, активность выброса ⁸⁸Kr и ¹³⁵Xe примерно равна показателю для ³H. Активности ¹⁴C, ^{83m}Kr, ⁸⁷Kr, ^{131m}Xe и ¹³⁸Xe близки к ⁸⁵Kr. Концентрации ¹³²⁻¹³⁵I в приземном слое воздуха примерно соответствуют ¹³¹I. Объёмные активности радионуклидов в составе аэрозолей можно оценить по ¹³⁷Cs.

В облаке суточного выброса АЭС наибольшие объёмные активности радионуклидов в приземном слое воздуха прогнозируются на удалении 1— 2 км от станции: до 12 Бк/м³ по ¹³³Хе, 1.6 по ³H, 0.15 по ⁸⁵Кг, 30 по ¹³¹I и 12 мкБк/м³ по ¹³⁷Сѕ (рис. 2, *a*). Максимум среднемноголетних объёмных активностей предполагается на таком же удалении, однако по абсолютным значениям исследуемые показатели будут ниже в 20–25 раз (рис. 2, *б*). По обоим вариантам расчёта установлено снижение объёмной активности радионуклидов в приземном слое воздуха по мере удаления от АЭС: примерно в 2 раза на расстоянии 3.5 км, в 10 раз — 15 км и до 25 раз – 30 км.



Рис. 2. Прогноз распределения объёмной активности радионуклидов из состава штатного выброса АЭС на оси следа: в облаке суточного выброса (a), средне-многолетние значения (b)

Различия в распределении объёмной активности, полученные по двум вариантам прогнозных расчётов (см. рис. 2), объясняются тем, что при расчёте среднемноголетней объёмной активности учитывается весь спектр метеорологических условий, в том числе атмосферные осадки и предельно неустойчивые состояния атмосферы. Последние определяют высокую концентрацию радионуклидов вблизи источника выброса, хотя вероятность их реализации составляет <10% в течение года.

Спрогнозированную объёмную активность радионуклидов выброса в приземном слое воздуха по обоим вариантам расчёта можно в первом приближении сопоставить с соответствующим показателем для радионуклидов естественного и искусственного происхождения. Так, концентрация ²²²Rn в атмосферном воздухе над поверхностью суши оценивается в диапазоне 1–10 Бк/м³, ⁷Be не превышает 3 мБк/м³, ²¹⁰Pb – до 0.5 мБк/м³ [17]. Объёмная активность ⁸⁵Kr, обусловленная всеми источниками его происхождения, в настоящее время составляет от 1 до 5 Бк/м³, а ¹³³Хе достигает сотых долей Бк/м³ [24–27].

Данные по распределению поверхностной активности 131 I, 89,90 Sr, 134,137 Cs из состава штатного выброса в почве спустя 60 лет с момента начала работы АЭС представлены на рисунке 3.

Наибольшая поверхностная активность в почве (до 6 Бк/м²) прогнозируется по ¹³⁷Cs на расстоянии <3 км от АЭС, что будет соответствовать удельной активности ~0.04 Бк/кг в корнеобитаемом слое почвы толщиной 0–10 см. Поверхностная активность других радионуклидов составит десятые доли Бк/м² по ¹³⁴Cs, сотые – по ¹³¹I и десятитысячные – по радиоизотопам стронция. По мере удаления от АЭС поверхностная активность этих радионуклидов в почве будет снижаться и на границе 30-километровой зоны не превысит десятых долей Бк/м² по ¹³⁷Cs.

Полученные результаты можно сопоставить с уровнем радиоактивного загрязнения почвы при глобальных радиоактивных выпадениях и с содержанием естественных радионуклидов. Так, согласно работе [17], в первой половине 1960-х годов в период наиболее интенсивного осаждения радионуклидов между 30-60° с.ш. поверхностная активность в почве ¹⁴⁴Се достигала 15000 Бк/м², ¹⁰⁶Ru – 8000 Бк/м², ⁹¹Y, ⁹⁵Zr, ⁵⁴Mn, ⁵⁵Fe, ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs – по ~2250 Бк/м². Важно указать, что содержание радионуклидов глобальных выпадений в почвах лесных биогеоценозов было в 2-3 раза выше по сравнению с приведёнными значениями [28], что определялось повышенной задерживающей способностью крон древесных растений, особенно хвойных [29]. К началу 2000-х годов поверхностная активность ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr за счёт глобальных выпадений на Европейской части России оценивалась в 1700 и 1000 Бк/м² [30], что соответствовало удельной активности 10 и 6 Бк/кг каждого радионуклида в 0-10-сантиметровом слое почвы. Удельная активность природных радионуклидов в почве находится в диапазонах 140-850 Бк/кг по ⁴⁰К, 17-60 Бк/кг по ²²⁶Ra и 11-64 Бк/кг по ²³²Th [17].

Таким образом, на современном этапе можно констатировать крайне низкую прибавку радионуклидов из состава штатного выброса АЭС в зоне их распространения к уже существующему уровню содержания техногенных и естественных радионуклидов в почве. Мощность амбиентного эквивалента дозы в облаке суточного выброса АЭС может достигать 2 нЗв/ч на удалении 1–3 км (рис. 4). Максимум среднемноголетнего дозового показателя от излучения радионуклидов из состава штатного выброса АЭС, находящихся в приземном слое воздуха, прогнозируется на расстоянии 1 км от источника выброса ~0.1 нЗв/ч. Ещё



Рис. 3. Прогноз распределения поверхностной активности радионуклидов из состава штатного выброса АЭС на оси следа

меньше ожидается мощность амбиентного эквивалента дозы от γ-излучения радионуклидов, находящихся в почве, — менее 0.01 нЗв/ч. К периферии 30-километровой зоны мощность дозы снижается примерно в 50 раз (см. рис. 4).

Спрогнозированные значения мощности дозы незначительны как по сравнению с естественным радиационным фоном, так и с дозовым показателем, рассчитанным для глобальных радиоактивных выпадений (табл. 3). Так, медиана мощности поглощённой дозы внешнего γ-излучения, измеренной на высоте 1 м, обусловленная присутствием естественных радионуклидов в почве, составляет 57 нГр/ч при межквартильном размахе 18—



Рис. 4. Прогноз распределения мощности амбиентного эквивалента дозы в приземном слое воздуха при штатном выбросе АЭС:

1 - в облаке суточного выброса, 2 - среднемноголетняя от излучения радионуклидов, находящихся в воздухе, <math>3 -от излучения радионуклидов в почве 93 нГр/ч [16, 17]. К этим значениям следует добавить ионизирующую (32 нГр/ч) и нейтронную (10 нГр/ч) составляющую космического излучения в приземном слое воздуха, которая возрастает по мере увеличения высоты над поверхностью моря [16, 17]. В целом суммарная мощность поглощённой дозы внешнего ү-излучения от всех естественных источников ионизирующего излучения составляет ~100 нГр/ч, что примерно соответствует мошности амбиентного эквивалента дозы 125 нЗв/ч [31-33]. Отсюда следует, что дозовый показатель, обусловленный естественным радиационным фоном, почти на два математических порядка больше по сравнению с таковым в облаке суточного радиоактивного выброса АЭС и на три порядка – по сравнению со среднемноголетними величинами мощности дозы.

Наибольший уровень содержания радионуклидов из состава глобальных радиоактивных выпадений в почве в середине 1960-х годов между $30-60^{\circ}$ с.ш. определил достаточно высокие значения расчётной мощности амбиентного эквивалента дозы — ~30 нЗв/ч [17]. В дальнейшем по мере распада радионуклидов дозовый показатель снижался и в середине 1970-х годов составил ~6.5 нЗв/ч [34]. В настоящее время γ-излучение ¹³⁷Cs из состава глобальных выпадений добавляет примерно 1.5 нЗв/ч к существующему уровню мощности амбиентного эквивалента дозы, однако определить достоверно это приращение на уровне флуктуации естественного радиационного фона невозможно.

Таким образом, в настоящее время можно констатировать незначительное увеличение радиационного фона в зоне распространения выбросов АЭС как по сравнению с его естественным уровнем, так и относительно глобального радиоактивного загрязнения.

Источник ионизир	Мощность амбиентного эквивалента дозы, нЗв/ч	
Штатные выбросы АЭС	облако суточного выброса	<2
	почва	<0.01
Естественные источники излучения	радионуклиды в почве	20–116
	космическое излучение	52
Глобальные радиоактивные выпаде-	в середине 1960-х годов	32
ния в почве	в середине 1970-х годов	6.5
	¹³⁷ Сѕ в настоящее время	1.5

Таблица 3. Мощность амбиентного эквивалента дозы у-излучения на в	высоте 1 м над поверхностью почвы от раз-
личных источников ионизирующего излучения	

* * *

Одна из ключевых проблем функционирования АЭС и территорий в зоне их расположения – снижение штатных выбросов. За последние 50 лет активность штатных выбросов АЭС с наиболее распространённым типом реакторов PWR снизилась на два математических порядка по радиоизотопам инертных газов, ¹³¹I, ³H и в 500 раз – по ра-диоактивным аэрозолям. Доля выработки электроэнергии АЭС с реакторами PWR и BWR составляет ~90%, однако их вклад в состав суммарного штатного выброса всеми атомными станциями относительно невелик: ~10% по ³H, ~30% по ¹³¹І и радиоактивным изотопам инертных газов, 40% по ¹⁴С. Поступление долгоживущих радионуклидов (³H, ¹⁴C, ⁸⁵Kr, ¹³⁷Cs) в окружающую среду определяется главным образом не штатными выбросами АЭС, а природным (³H, ¹⁴С), техногенным (образование ⁸⁵Кг при переработке ядерного топлива) и остаточным глобальным радиоактивным загрязнением (¹³⁷Cs). При этом в зонах аварийных выбросов АЭС и предприятий ядерного топливного цикла может сохраняться высокий уровень радиоактивного загрязнения в течение длительного времени.

Результаты прогнозирования показателей радиационной обстановки свидетельствуют, что в облаке суточного выброса АЭС зона наибольшей объёмной активности в приземном слое воздуха вероятна на удалении 1–2 км: до 12 Бк/м³ по ¹³³Хе, 1.6 – по ³H, 0.15 по ⁸⁵Кг, 30 по ¹³¹I и 12 мкБк/м³ по ¹³⁷Сs. Максимум среднемноголетних объёмных активностей предполагается на таком же удалении, однако по абсолютным значениям исследуемые показатели будут ниже в 20–25 раз. Наибольшая поверхностная активность в почве (до 6 Бк/м²) прогнозируется по ¹³⁷Сs на расстоянии <3 км от АЭС, что будет соответствовать удельной активности ~0.04 Бк/кг в корнеобитаемом слое почвы толщиной 0-10 см. Поверхностная активность других радионуклидов составит десятые доли Бк/м² по ¹³⁴Cs, сотые — по ¹³¹I и десятитысячные — по радиоизотопам стронция.

Мощность амбиентного эквивалента дозы в облаке суточного выброса АЭС может достигать 2 нЗв/ч на удалении 1-3 км, а среднемноголетне-го дозового -0.1 нЗв/ч, что значительно ниже по сравнению с естественным радиационным фоном (125 нЗв/ч).

ЛИТЕРАТУРА

- Мировое производство атомной энергии. https://www.nei.org/resources/statistics/world-nuclear-generation-and-capacity (дата обращения 23.11.2020).
- 2. Производство электрической энергии в Российской Федерации в 2020 г. по данным "Росатома". https://www.rosatom.ru/production/generation/ (дата обращения 23.11.2023).
- Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры / Под общ. ред. Л.А. Ильина и В.А. Губанова. М.: ИздАт, 2001.
- 4. The Fukushima Daiichi accident. Technical volume 4. Radiological consequences. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2015.
- Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Росатома / Под общ. ред. И.И. Линге и И.И. Крышева. М.: САМ полиграфист, 2015.
- Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2019 г. Обнинск: Росгидромет; НПО "Тайфун", 2020.
- Мониторинг природных и аграрных экосистем в районах расположения атомных электростанций / Под ред. проф. С.В. Фесенко. Серия "Труды ФГБНУ ВНИИРАЭ". Вып. 3. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2020.
- 8. Болтнева Л.И., Ионов В.А., Кузнецов З.В., Назаров И.М. Региональная закономерность в распределении естественных радиоактивных элементов

ВЕСТНИК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК том 91 № 7 2021

на территории Советского Союза // Фоновая радиоактивность почв и горных пород на территории СССР. Труды Ин-та прикл. геофизики. М.: Гидрометеоиздат, 1980. С. 37–55.

- 9. Дричко В.Ф., Крисюк Б.Э., Травникова И.Г. и др. Частотное распределение концентраций радия-226, тория 228 и калия-40 в различных почвах // Почвоведение. 1977. № 9. С. 75–80.
- 10. Переволоцкий А.Н., Переволоцкая Т.В. О содержании ⁴⁰K, ²²⁶Ra и ²³²Th в лесных почвах Республики Беларусь // Радиационная биология. Радиоэкология. 2014. № 2. С. 193–200.
- Переволоцкий А.Н. Радиационно-экологическая обстановка в лесных биогеоценозах (динамика, факторы, прогноз). Дисс... д-ра биол. наук. 03.01.01. Обнинск, 2013.
- 12. 12 *Маргулис У.Я.* Ядерная энергия и радиационная безопасность. М.: Энергоиздат, 1984.
- 13. Sources and effects of ionizing radiation: Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly with scientific annexes. V. 1. Scientific Annex B: Exposure of the public and workers from various sources of radiation. N.Y.: United Nations, 2008.
- 14. Sources and effects of ionizing radiation: Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly with scientific annexes. V.1. Scientific Annex B: Radiation exposures from electricity generation. N.Y.: United Nations, 2016.
- Переволоцкая Т.В., Переволоцкий А.Н., Спиридонов С.И. Кластерный анализ для оценки радиационного воздействия штатных выбросов АЭС на биоту // Радиация и риск. 2018. № 1. С. 43–52.
- 16. Sources and effects of ionizing radiation: Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly with scientific annexes. V.1. Scientific Annex B: Exposures to natural radiation sources. N.Y.: United Nations, 1982.
- 17. Sources and effects of ionizing radiation: Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly with scientific annexes. V.1. Scientific Annex C: Exposures to the public from man-made sources of radiation. N.Y.: United Nations, 2000.
- Израэль Ю.А. Радиоактивные выпадения после ядерных взрывов и аварий. СПб.: Прогресс-погода, 1996.
- 19. Гусев Н.Г., Беляев В.А. Радиоактивные выбросы в биосфере. М.: Энергоатомиздат, 1991.
- Perevolotskaya T.V., Perevolotskii A.N. Analysis of the long-term yearly average volumetric activity of radionuclides and the yearly absorbed dose in the surface air with continuous radioactive emissions (for Leningrad

NPP-2) // Atomic Energy. 2020. V. 128. № 3. P. 177–181.

- 21. Козлов В.Ф. Справочник по радиационной безопасности. М.: Энергоатомиздат, 1991.
- 22. Perevolotskii A.N., Perevolotskaya T.V. Evaluation of the radionuclide fallout density on the earth's surface in different variants of the calculation of the meteorological dilution parameters // Atomic Energy. 2019. V. 126. № 5. P. 320–324.
- Dose Coefficients for External Exposure to Environmental Sources. ICRP Publication 144 // Ann. ICRP. 2020. V. 49. № 2.
- 24. Winger K., Feichter J., Kalinowski M.B. et al. A new compilation of the atmospheric ⁸⁵Kr inventories from 1945 to 2000 and its evaluation in a global transport model // J. Env. Rad. 2005. V. 80. № 3. P. 183–215.
- *Тертышник Э.Г., Корсаков А.Т.* Темпы накопления ⁸⁵Кг в атмосфере // Атомная энергия. 1990. № 4. С. 267–271.
- Achim P., Generoso S., Morin M. Characterization of Xe-133 global atmospheric background: Implications for the Int. Monitoring System of the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty // J. Geophys. Res.: Atmospheres. 2016. V. 121. № 5. P. 4951–4966.
- Tomasek M., Wilhelmova L. Development of ⁸⁵Kr atmospheric activity and comparison with prognosis // J. Radioanal. and Nucl. Chem. 1997. V. 218. № 1. P. 119–121.
- Соколов В.Е., Криволуцкий Д.А., Усачёв В.Л. Дикие животные в глобальном радиоэкологическом мониторинге. М.: Наука, 1989.
- Алексахин Р.М., Нарышкин М.А. Миграция радионуклидов в лесных биогеоценозах. М.: Наука, 1977.
- Радиационная медицина. В 4-х томах. Т. 3. Радиационная гигиена / Под ред. акад. РАМН Л.А. Ильина. М.: ИздАт, 2002.
- Saito K., Jacob P. Gamma ray fields in the air due to sources in the ground // Radiat. Prot. Dosimetry. 1995. V. 58. P. 29–45.
- Saito K., Petoussi-Henss N. Ambient dose equivalent conversion coefficients for radionuclides exponentially distributed in the ground // J. of Nucl. Sc. Tech. 2014. V. 51. № 10. P. 1274–1287.
- 33. Рамзаев В.П., Барковский А.Н. К вопросу о связи между амбиентным эквивалентом дозы и поглощённой дозой в воздухе в условиях загрязнения окружающей среды радиоактивным цезием // Радиац. гигиена. 2015. № 3. С. 6–20.
- 34. Болтнева Л.И., Израэль Ю.А., Ионов В.А., Назаров И.М. Глобальное загрязнение ¹³⁷Сѕ и ⁹⁰Sr и дозы внешнего облучения на территории СССР // Атомная энергия. 1977. № 5. С. 355–360.