

7. **Иванов О.П., Игнатов С.М., Потапов В.Н. и др.** Гамма-сканер с антиколлиматором для визуализации источников γ -излучения. — Приборы и техника эксперимента, 2021, № 2, с. 115—120.
8. **Golovin V., Saveliy V.** Novel type of avalanche photodetector with Geiger mode operation. — Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 2004, v. 518, p. 560—565.
9. **Тараско М.З., Крамер-Агеев Е.А., Тихонов Е.Б.** Применение метода направленного расхождения для

восстановления дифференциального спектра быстрых нейтронов. — В сб.: Вопросы дозиметрии и защиты от излучений. М.: Атомиздат, 1970, вып. 11, с. 125—133.

10. **2016** Technology Demonstration Workshop (TDW) on Gamma Imaging-External. Rep. Vienna: IAEA, 2017.

Поступила в Редакцию 23.03.21

УДК 614.876+551.574.46

ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОЙ ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ СЕЛЬСКОГО НАСЕЛЕНИЯ ПРИ ПОСТОЯННЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ВЫБРОСАХ АЭС

Переволоцкий А.Н., Переволоцкая Т.В. (ФГБНУ ВНИИРАЭ, г. Обнинск)

e-mail: forest_rad@mail.ru

Поступление в окружающую среду радионуклидов — продуктов деления, их распространение в приземном слое воздуха, а также вовлечение в цепочки миграции с накоплением в звеньях-аккумуляторах может вызвать дополнительное облучение биологических объектов [1]. По этой причине для радиационной безопасности населения важно прогнозировать дозу внешнего и внутреннего облучения на этапе планируемой деятельности или модернизации предприятий с постоянными радиоактивными выбросами. В настоящее время разработаны научно-методические документы [1—6], на основе которых прогнозируется доза облучения населения вблизи источников постоянных выбросов [7, 8]. Тем не менее данная научная проблема остается одной из актуальных и направлена на получение новых знаний о закономерностях формирования дозы облучения биоты и человека.

Таким образом, цель настоящих исследований — прогнозная оценка содержания радионуклидов в окружающей среде и эффективной дозы облучения взрослого сельского населения при проживании на территории, прилегающей к источнику постоянных выбросов.

Материалы и методы. Исходными данными для расчета является активность годового выброса АЭС с четырьмя ВВЭР-1200. Суммарная активность радиоизотопов благородных газов в составе постоянного выброса предполагается равной 1,8 ПБк, %: ^{133}Xe 60, ^{135}Xe 17, ^{88}Kr 11, $^{83\text{m}}\text{Kr}$, $^{85\text{m}}\text{Kr}$, ^{87}Kr по 3, ^{85}Kr , $^{131\text{m}}\text{Xe}$, ^{138}Xe по 0,7, йода 1,9 ГБк, %: ^{133}I 29, ^{135}I 23, ^{133}I 20, ^{131}I 15, ^{134}I 13, радиоактивных аэрозолей 0,2 ГБк, %:

^{137}Cs 59, ^{134}Cs 40, ^3H — 15 ТБк, ^{14}C — 1,2 ТБк и нормирована на 1 ГВт мощности энергоблока [8]. Высота выброса принята равной геометрической высоте трубы от ее основания до устья 100 м, шероховатость земной поверхности в зоне распространения выброса 100 см.

Среднюю многолетнюю объемную активность рассчитывали для всех румбов в круговой розе ветров с помощью гауссовой модели рассеяния непрерывных выпадений, после чего выбирали румб с максимальными показателями объемной активности [1]. Среднемноголетние аэрологические условия для территории, включающие совместную частоту повторяемости категорий устойчивости атмосферы и скорости ветра на высоте выброса, а также интенсивность вымывания радионуклидов из приземного слоя воздуха $\sim 1,2 \cdot 10^{-6}$ 1/с, приняты согласно [9].

Плотность загрязнения корнеобитаемого слоя почвы за 30 лет постоянных радиоактивных выпадений рассчитывали, исходя из интенсивности осаждения радиоизотопов йода и цезия на земную поверхность в результате сухого осаждения и влажного выведения из атмосферы, а также константы очищения вследствие радиоактивного распада и миграции за пределы этого слоя.

При расчете среднемноголетней объемной активности и осаждения на земную поверхность предполагали, что радиоизотопы йода в составе выброса находятся в молекулярной форме [10].

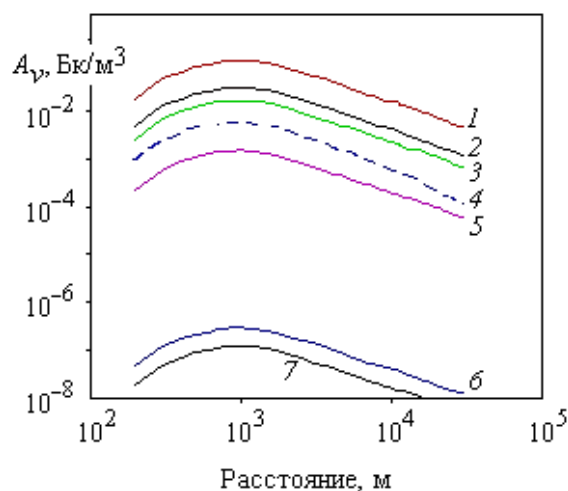
Удельную активность радионуклидов из состава постоянных выпадений в луговых травах, молоке, мясе и овощах рассчитывали для воз-

душного и корневого пути их поступления [3, 4]. Отдельно оценивали удельную активность зерновых культур и клубнеплодов [2].

Эффективную дозу облучения взрослого сельского населения рассчитывали на основе коэффициентов дозового преобразования для внешнего и внутреннего облучения [3, 4]. В качестве источника внешнего облучения рассмотрено поверхностное загрязнение почвы и приземного слоя воздуха, внутреннего — ингаляционное поступление радионуклидов и пероральное с продуктами питания. Для радиоактивных изотопов йода эффективную дозу при ингаляции рассчитывали для молекулярной формы нахождения в приземном слое воздуха с применением коэффициента дозового преобразования [10]. При расчете эффективной дозы были сделаны следующие консервативные допущения: взрослое сельское население постоянно проживает на оси исследуемого румба, время нахождения на открытом воздухе составляет 12 ч/сут, оставшаяся часть — в деревянном одноэтажном здании, объемную активность постоянного радиоактивного выброса в приземном слое воздуха принимали постоянной и одинаковой на открытом воздухе и в воздухе помещений на протяжении промежутка времени, в течение которого проводили расчеты.

При расчете внутреннего облучения вследствие перорального поступления радионуклидов принято потребление продуктов питания только местного производства, в наибольшей степени подверженных аэральному радиоактивному загрязнению на протяжении периода активной вегетации растений [3, 4]. Суточный рацион принят неизменным: 0,8 л цельного молока, 0,44 кг овощей и 0,25 кг мяса в сутки [3]. Эффективную дозу внутреннего облучения от ингаляционного и перорального поступления ^3H и ^{14}C рассчитывали консервативно в соответствии с [3, 4].

Поступлением радионуклидов с питьевой водой и прочими продуктами питания пренебрегали. Для оценки предельного загрязнения окружающей среды радиоизотопами йода и обусловленной ими дозы облучения взрослого сельского населения прогнозные расчеты осуществляли по всему диапазону расстояния относительно источника выброса (от 100 м до 30 км), включая санитарно-защитную зону. Расчетную дозу облучения ближе 1 км к источнику выброса



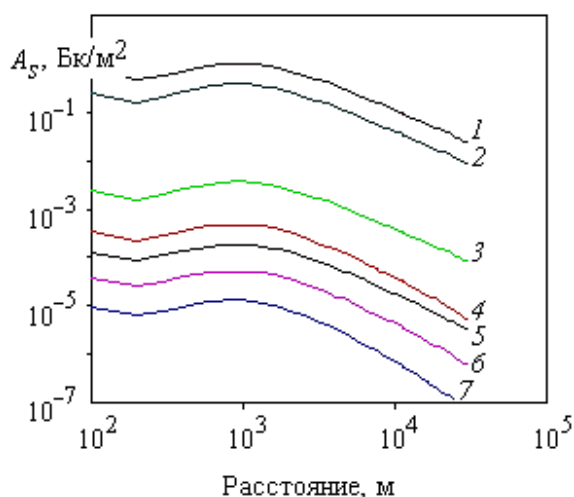
Р и с. 1. Среднегодовая объемная активность ^{133}Xe (1), ^{135}Xe (2), ^3H (3), ^{87}Kr (4), ^{14}C (5), ^{131}I (6), ^{137}Cs (7) в приземном слое воздуха на румбе с максимальной частотой реализации

следует рассматривать как наиболее консервативный вариант максимально возможного радиационного воздействия на население.

Результаты и обсуждение. Наибольшая среднегодовая объемная активность радионуклидов из состава постоянного выброса в приземном слое воздуха прогнозируется на расстоянии ~1 км от источника (рис. 1). Среди радионуклидов наибольшая концентрация ожидается ^{133}Xe ~0,1 Бк/м³, объемная активность ^{135}Xe составит 0,03 Бк/м³. Достаточно близка между собой концентрация ^3H и ^{87}Kr ~0,02 Бк/м³, что связано с их почти одинаковой активностью годового выброса. По этой же причине сопоставима среднегодовая объемная активность в приземном слое воздуха ~1 мБк/м³ ^{14}C , $^{83\text{m}}\text{Kr}$, ^{85}Kr , $^{131\text{m}}\text{Xe}$ и ^{138}Xe . Концентрация ^{137}Cs составит десятые доли мБк/м³, ^{134}Cs — сотые доли. На удалении 1 км от источника выброса концентрация радиоизотопов йода прогнозируется в диапазоне от 0,6 мБк/м³ ^{133}I до 0,3 мБк/м³ ^{131}I и ^{134}I (рис. 2).

Среднегодовая объемная активность радионуклидов в приземном слое воздуха будет снижаться в обратной зависимости от расстояния до источника выброса и их периода полураспада. Так, на границе 30-километровой зоны концентрация ^{138}Xe снизится в 1500 раз, ^{131}I — в 75 раз, в то время как по большинству радионуклидов примерно в 25 раз.

Таким образом, в приземном слое воздуха вблизи источника выброса будут преобладать



Р и с. 2. Плотность загрязнения поверхностного слоя почвы за 30 лет постоянных выпадений ^{137}Cs (1), ^{134}Cs (2), ^{131}I (3), ^{133}I (4), ^{135}I (5), ^{132}I (6), ^{134}I (7) на рубеже с максимальной частотой реализации

^{133}Xe , ^{135}Xe , ^3H и ^{88}Kr , объемная активность радиоизотопов иода и цезия ожидается на очень низком уровне, содержание ^{137}Cs сопоставимо с фоновым в атмосфере [7, 11].

Среднегодовое интенсивность осадения радиоизотопов иода на земную поверхность на удалении 1 км от источника выброса оценивается в диапазоне 0,3—0,5 мБк/(м²·сут), цезия — ~0,2 мБк/(м²·сут). Соответственно при постоянных радиоактивных выпадениях в течение длительного времени будут накапливаться долгоживущие радионуклиды в корнеобитаемом слое почвы. Плотность загрязнения почвы ^{137}Cs на удалении ~1 км за 30 лет выпадений может достигнуть 1 Бк/м², на границе 30-километровой зоны — 0,008 Бк/м², для ^{134}Cs исследуемые величины будут в 1,5 раза ниже (см. рис. 2). Для радиоизотопов иода из-за их малого периода полураспада плотность загрязнения почвы быстро стабилизируется вследствие установления равновесия между поступлением и радиоактивным распадом. Равновесная плотность загрязнения почвы ^{131}I составит 3 мБк/м² и стабилизируется спустя два месяца после начала выпадений. С увеличением расстояния от источника выброса плотность загрязнения будет снижаться с той же интенсивностью, что и объемная активность в приземном слое воздуха. Обращает на себя внимание слабое изменение плотности загрязнения корнеобитаемого слоя почвы на расстоянии 100—1500 м, что связано с вымыванием

радиоизотопов атмосферными осадками. Вблизи источника постоянного выброса, где струя наиболее плотная и компактная, вымывание радионуклидов из атмосферы происходит интенсивнее.

В целом можно констатировать, что постоянные радиоактивные выпадения АЭС вносят небольшой вклад в фоновое загрязнение ^{137}Cs , которое обусловлено глобальными радиоактивными выпадениями и составляет 1—1,5 кБк/м² в европейской части страны [7, 11].

На расстоянии ~1 км от источника выброса наибольшее содержание радиоизотопов иода и цезия из состава постоянного выброса прогнозируется в луговых травах, молоке, мясе и овощах (табл. 1). Так, удельная активность ^{131}I и ^{137}Cs в травах составит ~7 мБк/кг воздушно-сухой массы, в молоке ~1 мБк/л, в мясе до 5 мБк/кг ^{137}Cs . Концентрация ^{134}Cs примерно в 2 раза ниже по сравнению со ^{137}Cs . Удельная активность ^{132}I — ^{135}I в перечисленных продуктах в 5—10 раз меньше по сравнению со ^{131}I . Содержание радиоизотопов цезия в зерновых культурах и картофеле на данном расстоянии оценивается десятками долями мБк/кг. По мере удаления от источника выброса концентрация в луговых травах и продуктах питания будет снижаться, как и плотность загрязнения почвы. Характерно, что для радиоизотопов цезия основным путем поступления в перечисленные продукты является корневой, для радиоизотопов иода — воздушный. Это определяется накоплением долгоживущих радиоизотопов цезия в почве, что не так выражено для короткоживу-

Т а б л и ц а 1. Прогнозируемая концентрация радионуклидов в травостое и основных дозообразующих продуктах питания на расстоянии 1 км от источника выброса, мБк/кг(л)

Вид продукции	^{131}I	^{132}I	^{133}I	^{134}I	^{135}I	^{134}Cs	^{137}Cs
Травостой (на воздушно-сухую массу)	6,8	0,2	2,1	>0,1	0,6	3,4	7,7
Молоко	1,1	>0,1	0,3	>0,1	>0,1	0,5	1,2
Мясо	0,1	—	—	—	—	1,9	4,6
Овощи	0,7	>0,1	0,2	>0,1	>0,1	0,3	0,5

Таблица 2. Расчетная эффективная доза облучения сельского населения от различных источников излучения, нЗв/сут

Расстояние, км	Источник облучения					
	внешний		внутренний			
	Облако выброса	Поверхность почвы	Ингаляция радионуклидов из облака выброса	Ингаляция и пероральное поступление		Пероральное поступление I и Cs
				³ H	¹⁴ C	
1	0,33	0,04	2,6·10 ⁻⁴	0,13	1,05	0,07
10	0,04	4·10 ⁻³	2,2·10 ⁻⁵	0,02	0,14	8·10 ⁻³
30	9·10 ⁻³	9·10 ⁻⁴	6,1·10 ⁻⁶	5·10 ⁻³	4·10 ⁻²	2·10 ⁻³

щих изотопов йода. Кроме того, интенсивность осаднения ^{134}Cs и ^{137}Cs на почву меньше по сравнению с радиоизотопами йода.

Следует отметить, что содержание ^{137}Cs в основных продуктах питания, обусловленное глобальными радиоактивными выпадениями на территории европейской части страны, примерно в 1000 раз больше по сравнению с концентрацией, рассчитанной при постоянных выбросах АЭС [11]. Соответственно поступление вследствие постоянных радиоактивных выбросов увеличит его удельную активность в основных продуктах питания не более чем на десятые доли процента.

Эффективная доза внешнего и внутреннего облучения взрослого сельского населения радионуклидами из состава постоянного выброса оценивается, нЗв/сут: ~1,6 на расстоянии ~1 км от источника, ~0,2 — 10 км, 0,06 — на границе 30-километровой зоны (табл. 2). При этом важно еще раз отметить консервативный характер расчета, поскольку рассматривали только период активной вегетации, предполагая постоянное проживание на данной территории и потребление продуктов питания местного производства. Тем не менее даже в зоне максимальной концентрации радионуклидов выброса в приземном слое воздуха рассчитанная эффективная доза 1,6 нЗв/сут значительно ниже по сравнению с допустимой для населения согласно НРБ—99/2009 (1 мЗв/год, или 2,7 мкЗв/сут) и квотой на облучение населения от газоаэрозольных выбросов действующей АЭС — 200 мкЗв/год, или 0,55 мкЗв/сут [12, 13]. По мере удаления от источника выброса эти различия еще больше увеличиваются.

В табл. 2 приведена структура эффективной дозы облучения взрослого сельского населения. Вблизи источника выброса около 65% эффективной дозы формируется за счет ингаляционного и перорального поступления ^{14}C , вторым по значимости 20% является внешнее облучение из облака радиоактивного выброса. Поступление радиоизотопов йода и цезия с продуктами питания определит не более 4,3% эффективной дозы. Еще меньшим вкладом характеризуется внешнее облучение от поверхности почвы. По мере удаления от источника выброса возрастает вклад в формирование дозы ^{14}C и ^3H , остальных источников снижается, что вызвано интенсивным уменьшением объемной активности короткоживущих радионуклидов. Это подтверждается изменениями вклада в эффективную дозу внешнего облучения из облака выброса. В облаке выброса, как в источнике внешнего облучения, 95% эффективной дозы формируют ^{88}Kr ~73%, ^{87}Kr и ^{133}Xe по ~9% (табл. 3).

Пероральное поступление радиоизотопов йода и цезия в период активной вегетации определяет только 3,5—4,3% эффективной дозы взрослого сельского населения в зависимости от расстояния до источника выброса (табл. 4). Примерно половина этой дозы обусловлена поступлением радионуклидов с молоком, 1/3 — с мясом, остальная часть — с овощами. При пероральном поступлении радионуклидов с молоком и овощами основным дозообразующим радионуклидом является ^{131}I .

Таблица 3. Вклад радионуклидов в эффективную дозу внешнего облучения от облака радиоактивного выброса на расстоянии 1 км от источника

Радионуклид	Вклад, %
^{88}Kr	72,7
^{135}Xe	9,0
^{87}Kr	8,6
^{138}Xe	4,3
^{133}Xe	3,6
^{85m}Kr	1,7
Остальные радионуклиды	0,1

Т а б л и ц а 4. Вклад радионуклидов и компонентов рациона в эффективную дозу внутреннего облучения при пероральном поступлении на расстоянии 1 км от источника выброса, %

Радионуклид	Компонент рациона	Вклад
^{131}I	Молоко	24,8
^{133}I		1,2
^{134}Cs		10,7
^{137}Cs		16,9
^{131}I	Мясо	4,2
^{133}I		—
^{134}Cs		9,8
^{137}Cs		15,8
^{131}I	Овощи	8,7
^{133}I		0,5
^{134}Cs		3,4
^{137}Cs		3,9

Заключение. В ходе проведения исследований рассчитаны среднесуточные объемная активность радионуклидов в приземном слое воздуха, интенсивность их осадения на земную поверхность и эффективная доза облучения взрослого сельского населения, проживающего вблизи источника постоянных радиоактивных выбросов мощностью 1 ГВт. Установлено, что на румбе с максимальным осадением радионуклидов из состава постоянного выброса их содержание в почве и продуктах питания в 1000 раз меньше по сравнению с уровнем, обусловленным глобальными радиоактивными выпадениями. Рассчитанная эффективная доза 1,6 нЗв/сут для сельского населения значительно ниже по сравнению с допустимой согласно НРБ—99/2009 1 мЗв/год, или 2,7 мкЗв/сут и квотой на облучение населения от газоаэрозольных выбросов действующей АЭС — 200 мкЗв/год, или 0,55 мкЗв/сут.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев Н.Г., Беляев В.А. Радиоактивные выбросы в биосфере. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.
2. Романов Г.Н. Ликвидация последствий радиационных аварий. Справ. рук-во. М.: ИздАТ, 1993. 336 с.
3. Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment. Vienna: IAEA, 2001. 229 p.
4. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендуемые методы расчета параметров, необходимых для разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух» (РБ-106—15). М., НТЦ ЯРБ, 2015. 74 с.
5. Sources and Effects of Ionizing Radiation. V. 1. Sources. New York: United Nations, 2016. 502 p.
6. Разработка и установление нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ атомных станций в атмосферный воздух. Методика. МТ 1.2.1.15.1176—2016. М., Концерн Росэнергоатом, 2016. 75 с.
7. Газиев И.Я., Крышев А.И. Модельные расчеты радиоактивного загрязнения атмосферы, местности, сельскохозяйственной продукции и доз облучения населения в зоне наблюдений Нововоронежской АЭС. — Радиация и риск, 2010, т. 19, № 1, с. 48—59.
8. Мониторинг природных и аграрных экосистем в районах расположения атомных электростанций. Труды ФГБНУ ВНИИРАЭ. Вып. 3. Под ред. С.В. Фесенко. Обнинск, ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2020. 170 с.
9. Sources and Effects of Ionizing Radiation. V. 1. Sources. New York: United Nations, 2000. 65 p.
10. The ICRP Database of Dose Coefficients: Workers and Members of the Public. Ver. 3.0. New York: Elsevier Sci., 2001.
11. Радиозэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Росатома. Под ред. И.И. Линге и И.И. Крышева. М.: Сам полиграфист, 2015. 296 с.
12. Нормы радиационной безопасности (НРБ—99/2009). М., НТЦ ЯРБ, 2009. 100 с.
13. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АЭС—03). М., НТЦ ЯРБ, 2003. 15 с.

Поступила в Редакцию 13.12.20

Р е ф е р а т ы

УДК 621.039.58

Рачков В.И., Суслов И.Р., Хомяков Ю.С., Швецов Ю.Е. Анализ последствий крупной течи парогенератора в двухконтурной реакторной установке со свинцовым теплоносителем. — Атомная энергия, 2021, т. 130, вып. 3, с. 183 — 188.

Для анализа крупной течи парогенератора реактора БРЕСТ-ОД-300, инициируемой разрывом парогенерирующей

трубки, разработан мультифизический (нейтроника + теплогидравлика) код UNICO-2F. Код рассчитывает стационарные 3D-поля скорости, температуры и давления теплоносителя, концентрацию пара и поле энерговыделение, температуру топлива и оболочек ТВЭЛов.

В качестве исходного отказа при анализе динамики параметров активной зоны постулируется разрыв парогенерирующей трубки. Показано, что при разрыве полным