

РАДИАЦИОННЫЕ И РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ВЫБРОСОВ ТРИТИЯ В АТМОСФЕРУ

Л. Ф. Беловодский, А. С. Хапов, В.Г. Киселёв, М. С. Панюшкин

ВНИИА им. Н. Л. Духова, Москва
vniia4@vniia.ru

Представлены результаты анализа данных по миграции трития, в том числе и в форме оксида, в объектах окружающей среды (воздух, вода, почва, растительность). Рассмотрены источники поступления трития в атмосферу и закономерности формирования радиоактивных отходов (газообразные, жидкие, твердые). Приведена оценка доз облучения населения от реально существующих источников выбросов трития в атмосферу. Рассмотрены аспекты тритиевой опасности при переходе к термоядерной энергетике.

Введение

В настоящее время исследования и разработки в области управляемого термоядерного синтеза вышли на этап создания международного термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР) с магнитным удержанием плазмы [1–2]. Сооружение ИТЭР осуществляется в г. Кадараш (Франция) с участием специалистов РФ, США, Японии, Германии [3].

С точки зрения радиационной безопасности термоядерный реактор (ТР) представляет собой крайне мощный и недостаточно изученный объект, являющийся мощным источником нейтронов, гамма-квантов и радиоактивных продуктов активации. Отличительной особенностью ТР является использование в работе большого количества трития. Для обеспечения безопасной эксплуатации ТР необходим тщательный анализ опыта эксплуатации существующих установок и производств, в которых используется или образуется тритий.

При работе с тритием образуются газообразные, жидкие и твердые отходы, содержащие как элементарный тритий, так и его соединения: оксид трития, органически связанный тритий и тритиды металлов. Тритий и его соединения из технологических контуров оборудования ТР за счет процессов диффузии и утечек поступает в воздух рабочих помещений и в окружающую среду.

Во внешней среде тритий вступает во взаимодействие с атмосферным воздухом, водой, почвой, растительностью, а затем за счет ингаляции и по пищевым цепочкам поступает в организм человека.

В работе рассмотрены существующие источники поступления трития в окружающую среду, формирование радиоактивных отходов при работе с тритием, оценены дозы облучения населения от источников трития.

Источники поступления трития в окружающую среду

Поступление трития (Т) в окружающую среду обусловлено как естественными, так и техногенными процессами. Среди естественных источников трития наиболее мощным является процесс взаимодействия космического излучения с молекулами, входящими в состав воздуха, протекающий в верхних слоях атмосферы со скоростью $7,4 \cdot 10^4$ ТБк/год и в настоящее время составляет $(1,0 \div 1,3) \text{ ЭБк } ((2,7 \div 3,5) \cdot 10^7 \text{ Ки})$ [4, 5].

Другим менее значимым источником являются ядерные реакции, протекающие в земной коре [6].

Упрощенный тритиевый цикл в окружающей среде включает образование молекул тритированной (НТО) воды в результате радиационно-химических реакций и осаждение образовавшейся воды на земную и водную поверхность [6]. Превращение космогенного трития в НТО в атмосфере происходит с характерным временем 6,5 лет или с учетом распада трития – 4,8 года [7]. Считается, что около 90 % природного трития содержится в гидросфере, 10 % в стратосфере и 0,1 % в тропосфере.

К искусственным источникам трития относятся ядерные реакторы (ЯР), заводы по переработке ядерного топлива, заводы по производству трития, установки по использованию трития мирного и военного назначения, а в будущем – термоядерные реакторы.

Значительным источником трития ранее были испытания ядерных и термоядерных устройств. Взрыв водородной бомбы мощностью 1 Мт приводит к выделению 7–20 МКи трития ($2,6 \cdot 10^{17}$ – $7,4 \cdot 10^{17}$ Бк) [8]. После взрыва тритий выпадает на земную поверхность с атмосферными осадками. Так в пробах дождевой воды, взятой до марта 1954 г., обнаруживался главным образом космогенный тритий. Но с начала испытаний термоядерного оружия содержание трития в дождевой воде выросло с 0,5–5,0 до 500 ТЕ (ТЕ – тритиевая единица, равная отношению одного атома Т к 10^{18} атомам водорода, $1 \text{ ТЕ} = 3,3 \cdot 10^{-12} \text{ Ки}$ на 1 л воды (0,12 Бк/л)).

Общее количество поступившего в биосферу трития в результате испытаний ядерного оружия составляет 1900–8000 МКи ($7,0 \cdot 10^{19}$ – $3,0 \cdot 10^{20}$ Бк) [9].

Наиболее вероятное поступление трития в биосферу оценивается в 2890 МКи, причем 80 % приходится на долю северного полушария.

Тритий поступает также в окружающую среду из ядерных реакторов АЭС и в процессе переработки ядерного топлива. Нормативный выброс трития на АЭС с реакторами типа PWR оценивается равным 0,1 Ки в год на 1 МВт (электроэнергии), а на АЭС с реакторами BWR – 0,05 Ки в год на 1 МВт (электроэнергии), существенно более высокое значение выброса наблюдается на АЭС с тяжеловодными реакторами – до 600 Ки в год. Фактический годовой выброс Т как на АЭС с реакторами типа BWR, так и на АЭС с реакторами типа PWR изменяется в широких пределах от долей кюри до 10^3 Ки в год [8].

Существенное количество Т поступает в окружающую среду с заводов по получению и переработке Т для нужд промышленности, науки и оборонной техники (табл. 1.1), а также заводов по переработке ядерного топлива.

Таблица 1.1

Выбросы трития в атмосферу из атомных центров

Наименование производства	Выброс трития в атмосферу		
	Ки/год (Бк/год)	Процент от глобального	Максимальный аварийный Ки (Бк)
1. Завод по производству и разделению трития (Саванна-Ривер, США)	$8 \cdot 10^5$ ($2,96 \cdot 10^{16}$)	42	$5 \cdot 10^5$ (1974 г.) ($1,85 \cdot 10^{16}$) $1,7 \cdot 10^5$ (1987 г.) ($6,29 \cdot 10^{15}$)
2. Завод по переработке ядерного горючего (Буффало, США)	$1,8 \cdot 10^4$ ($6,66 \cdot 10^{14}$)	0,95	–
3. Ливерморская лаборатория им. Лоуренса (США)	200 ($7,4 \cdot 10^{12}$)	–	$2,9 \cdot 10^5$ (1970 г.) ($1,07 \cdot 10^{16}$)
4. Маундская лаборатория (США)	600 ($2,22 \cdot 10^{13}$)	0,09	–

С заводов по переработке ядерного горючего 25 % (от общего количества поступающего во внешнюю среду Т выбрасывается с жидкими отходами и 10 % подлежит захоронению (твердые отходы). Выбрасываемый в атмосферу Т находится как в виде газа (25 %), так и в форме НТО (75 %) [6].

Завод в Саванна-Ривер (табл. 1.1) выбрасывает Т через трубу высотой 63 м, при этом 40 % поступает в атмосферу в форме газа и 60 % – НТО. В аварийных выбросах более 99 % трития находится в форме газа.

Получение электроэнергии в термоядерных реакторах в будущем может привести к выбросам в окружающую среду значительного количества трития. Оценки показывают, что для работы электростанции мощностью 1 ГВт (эл.)/год, использующей ядерную реакцию $d(t,n)He$ необходимо 170 кг трития в год. В проектах ядерных реакторов без blankets предполагается использовать только энергию, уносимую ядрами гелия. В этом случае необходимо 860 кг трития в год [10].

В работе [13] приводятся данные о количестве трития ежедневно образующегося в реакторах различных типов мощностью 3 ГВт за счет различных источников, Ки/сут.

Реактор на тепловых нейтронах	
Деление -----	50
Борное управление реактивностью	
– в PWR -----	10–60
– в BWR -----	2–15-
Загрязнение первичного теплоносителя	
Литием, 10^6 -----	25
Дейтерием в обычной воде -----	0,03
Тяжеловодный замедлитель -----	80–150
Быстрый реактор -----	50–100
Термоядерный реактор -----	10^6 – 10^7 (прогноз).

Типичные величины загрузки в отдельных системах ТР мощностью 600 МВт представлены в табл. 1.2 [11].

Т а б л и ц а 1.2

Загрузки трития в системах термоядерного реактора

Система реактора	Загрузка тритием, г
1	2
В первой стенке	100–1000
В системе дивертора	300–1500
В системах дополнительного нагрева плазмы	1–10
В материалах бланкета	
– в жидкой эвтетике	10–100
– в твердом оксиде	500–1000
В теплоносителе	10–15
В системе подпитки топливом	250
В системах переработки трития	400
В хранилищах трития	250–550
В хранилищах, отработавших срок службы компонентов ТР	20–40
Всего:	1830–4765

Из представленных данных видно, что в виде твердых отходов (отработавших срок службы компонентов реактора) находится ~ 1% Т от его количества в реакторе.

При указанных загрузках в системах ТР выход трития в рабочие помещения реакторного здания, а затем и во внешнюю среду оценивается следующими количествами (табл. 1.3) [11].

Т а б л и ц а 1.3

Выход трития в реакторное здание

Система	Нормальная эксплуатация, Ки/сут	Обслуживание, Ки/сут	Авария, Ки/сут
Тороидальная камера	10^{-2} –20	–	10^3
Дивертор	–	$<10^3$	–
Первая стенка и бланкет	–	$<10^{-3}$	10^{-5}
Система диагностики	10^{-2} – 10^{-1}	<50	10^3
Система подпитки	10^{-2} –5	$10 \dots 10^2$	$<2 \cdot 10^5$
Система извлечения трития	10^{-2} – 10^{-1}	<10	$<2 \cdot 10^4$
Насосы	10^{-2} – 10^{-1}	<50	10^2 – 10^5
Первичный теплонакопитель:			
– охлаждение первой стенки и дивертора	<6	2–210	$<10^5$
– бланкеты	$<0,2$	~1	30–60
– защиты	$<0,2$	~1	10^5
Всего:	30	10^3	10^5

Видно (см. табл. 1.3), что при круглосуточной работе термоядерного реактора выбросы Т могут достигать $3,6 \cdot 10^5$ Ки/год, что сравнимо с выбросами заводов по производству и разделению Т (см. табл. 1.1).

Формирование радиоактивных отходов при работе с тритием

При работе с тритием и его соединениями образуются газообразные, жидкие и твердые тритийсодержащие отходы [7]. В соответствии с действующими «Санитарными правилами...» к газообразным радиоактивным отходам относятся не подлежащие использованию газы, образующиеся при производственных процессах с объемной активностью трития, превышающей $4,4 \cdot 10^6$ Бк/м³ ($1,2 \cdot 10^{-8}$ Ки/л) [12]. Жидкие отходы считаются радиоактивными, если в них удельная активность трития превышает значение $7,7 \cdot 10^4$ Бк/кг ($2 \cdot 10^{-6}$ Ки/кг). К твердым радиоактивным отходам относятся отработавшие свой ресурс тритиевые источники, не предназначенные для дальнейшего использования материалы, изделия, оборудование, биологические объекты, загрязненные объекты внешней среды, отвержденные жидкие отходы, в которых удельная активность трития превышает значение $1 \cdot 10^9$ Бк/кг ($\sim 3 \cdot 10^{-2}$ Ки/кг).

Из опыта эксплуатации российских промышленных производств по переработке больших количеств трития следует, что все образующиеся отходы относятся к категории радиоактивных (табл. 2.1). При этом объем газообразных отходов в 10^6 – 10^7 раз больше, чем жидких и твердых отходов.

Жидкие и твердые отходы подвергаются переработке и захоронению, а газообразные отходы после очистки выбрасывают в окружающую среду [7]. Экспериментально установлено, что в вентиляционных выбросах тритий на 50–70 % от общей активности присутствует в форме НТО.

Таблица 2.1

Формирование радиоактивных отходов

Вид отходов	Объем м ³ /год	Активность Т в отходах		
		Ки/год	%	Средняя объемная Ки/л (Ки/кг)
1. Газообразные	$3,0 \cdot 10^8$	$9,2 \cdot 10^3$ *	26,4	$3,07 \cdot 10^{-8}$
2. Жидкие	$5,1 \cdot 10^2$	$5,3 \cdot 10^2$	1,8	$1,04 \cdot 10^{-3}$
3. Твердые	10,0	$2,5 \cdot 10^4$	71,8	2,50

Примечание: * Выброс в атмосферу после системы очистки; количество образующихся отходов $>10^5$ Ки/год, тогда газообразные отходы составляют более 90% от всех отходов производства.

Поскольку НТО радиотоксичнее трития в 10^4 раз [12], то даже при содержании НТО в выбросах в количестве долей процента, основным фактором радиационной опасности для населения следует считать НТО, содержащуюся в газовых выбросах.

Источники поступления трития в газообразные выбросы представлены в табл. 2.2. Из данных табл. 2.2 видно, что основным источником поступления трития в атмосферу являются технологическое оборудование (технологические отходящие газы). При этом установлено, что в отходящих газах может содержаться свыше 90 % трития в форме НТО.

Таблица 2.2

Распределение среднегодовых выбросов трития в атмосферу

Источник выброса	Выброс трития	
	Ки/год	%
1. Откачка технологического оборудования	1310	16
2. Вскрытие оборудования, контейнеров	2870	35
3. Нагревание урановых ловушек	2540	31
4. Аварийные утечки	900	11
5. Общеобменная вентиляция	570	7
Всего:	8200	100

Оценка поступления трития из атмосферы в почву, растительность и водоемы

Тритий, сброшенный в окружающую среду, поступает в звенья экологической системы (почвенная вода – растительность – животное – человек). При этом количество выбрасываемого в окружающую среду трития – основной фактор, определяющий его содержание в звеньях экологической системы. Между тритием в форме НТО и другими звеньями экологической системы достаточно быстро устанавливается равновесие [13]. Считается, что Т избирательно не накапливается в отдельных элементах экологической системы, поскольку не обнаружено биохимических реакций, приводящих к его накоплению. Поэтому концентрация трития в любом звене экологической системы не превышает его содержания в воде.

Моделированию поведения трития в окружающей среде посвящено достаточно большое количество публикаций [14–16]. Существуют численные модели различной сложности и различной иерархии, начиная с моделей глобального трития, моделей, описывающих поведение трития в воздухе, почве, растительности [14]. В последние годы достигнут значительный прогресс в области математического моделирования поведения трития в объектах окружающей среды [17–20]. Для этих целей при МАГАТЭ была создана рабочая группа BIOMASS (Biosphere Modeling and Assessment), в которую входили представители США, Англии, Германии, Франции, России и др. Эта группа разрабатывает типовые модели поведения трития в объектах окружающей среды на основе экспериментальных данных, представляемых странами-участниками группы.

Поступление трития в почву может происходить различными путями. Тритий может поступать из водоемов, вода которых содержит НТО, и в результате поглощения почвой Т и НТО из воздуха (сухое осаждение) и с каплями дождя (мокрое осаждение). При мокром осаждении Т в почву не поступает, поскольку его растворимость в воде чрезвычайно низка [7]. В то же время при сухом осаждении Т достаточно быстро поступает в почву и благодаря деятельности почвенных микроорганизмов превращается в НТО. Французские и канадские эксперименты 1987 г. показали, что скорость осаждения Т на поверхность почвы составляет 0,016–0,15 см/с.

Экспериментально установлено, что пары НТО поглощаются почвой лучше, чем Т. По данным [14] скорость осаждения НТО на почву для сухого и влажного осаждения составляет 0,35 см/с, что практически совпадает со скоростью осаждения НТО на водной поверхности равной 0,34 см/с [7]. По данным [14] скорость осаждения НТО на почву может достигать 2,4 см/с, таким образом, скорость осаждения НТО на почву практически на порядок превышает скорость осаждения Т.

Удаление НТО из почвы происходит вследствие испарения. Наиболее быстрое удаление НТО наблюдается в первые несколько суток после осаждения (от 1 до 18 % в час при температуре 20 °С в зависимости от типа почвы и влажности воздуха [16]). В дальнейшем интенсивность удаления уменьшается до 0,25–1,5 % в час в связи с заглублением НТО в почву. В период быстрого выведения НТО в основном находится в верхнем 10-сантиметровом слое почвы. Характерное время проникновения Т на глубину 10–15 см составляет более 100 час. Период полувыведения НТО в начальный момент, в зависимости от влажности и водного режима почвы изменяется от 7,4 до 27 суток. В этот период из почвы выводится до 80 % НТО. Для оставшихся 20 % НТО характерный период полувыведения составляет 27 месяцев [6]. Более 50 % НТО поглощается на расстоянии до 1000 км от источника выброса и кинетика процессов обмена почва-воздух должна заметно влиять на содержание НТО в воздухе на расстоянии 100...1000 км. Вблизи источника выброса НТО загрязнение сельскохозяйственных растений и водоемов может оказаться значительным. При осаждении НТО в водоемы происходит ее быстрое разбавление, и удельная концентрация НТО в парах воды из водоемов вторичного загрязнения воздуха практически не происходит [8].

В РФ проводились эксперименты по определению содержания НТО в объектах окружающей среды при наличии и отсутствии источника выброса [22].

В работе [21] представлены результаты контроля содержания НТО в окружающей среде Японии (табл. 3.2).

Таблица 3.1

Содержание трития в окружающей среде Японии [9]

Вид пробы, химическая форма трития	Пункт контроля	Единица измерения	Удельная активность
Пары НТО в воздухе	г. Фукусима*	мБк/м ³	19–23
НТО в воздухе	г. Фукусима*	мБк/м ³	33–47
Осадки	г. Фукусима*	мБк/л	0,1–3,4
Грунтовые воды	Преф. Той Ята	мБк/л	0,0–4,8
Речная вода	Вся Япония	мБк/л	0,4–1,1
Вода в океане	Тихий океан, Японское море	мБк/л	0,0–0,6

* Приведены результаты контроля до аварии 2010 года.

Следует отметить, что Япония является островной страной, поэтому концентрация НТО в атмосфере, а также в речной и грунтовой воде на материковой части суши может быть в несколько раз выше. Содержание НТО в атмосферной влаге на суше на 1...2 порядка величины выше, чем над поверхностью океана.

Результаты определения содержания трития в объектах окружающей среды вблизи от источника выброса (табл. 3.2) Плотность выпадения НТО на поверхность земли определяли путем анализа проб снега за весь период снеготаяния на различных расстояниях от источника выброса (табл. 3.3).

Таблица 3.2

Содержание НТО в объектах окружающей среды в зависимости от расстояния от источника выброса, Ки/л (Ки/кг)

Расстояние от источника выброса, км		1980	1981	1982	1983	1984
0,3	Воздух	$2,8 \cdot 10^{-12}$	$1,1 \cdot 10^{-12}$	$1,1 \cdot 10^{-12}$	$1,1 \cdot 10^{-12}$	$1,3 \cdot 10^{-12}$
	Почва	$2,5 \cdot 10^{-8}$	–	$2,1 \cdot 10^{-9}$	–	–
	Растительность	$1,1 \cdot 10^{-8}$	–	$3,1 \cdot 10^{-8}$	–	–
1,5	Воздух	$1,2 \cdot 10^{-13}$	$8,5 \cdot 10^{-14}$	$5,4 \cdot 10^{-14}$	$6,2 \cdot 10^{-14}$	$8,1 \cdot 10^{-14}$
	Почва	$3,8 \cdot 10^{-8}$	–	$4,6 \cdot 10^{-9}$	$2,2 \cdot 10^{-9}$	–
	Растительность	$7,7 \cdot 10^{-8}$	–	$4,3 \cdot 10^{-8}$	$9,9 \cdot 10^{-9}$	–
5,0	Воздух	$9,7 \cdot 10^{-14}$	$7,2 \cdot 10^{-14}$	$3,0 \cdot 10^{-14}$	$3,2 \cdot 10^{-14}$	$6,2 \cdot 10^{-14}$
	Почва	$6,7 \cdot 10^{-9}$	$2,7 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-9}$	$2,6 \cdot 10^{-9}$	$6,2 \cdot 10^{-9}$
	Растительность	$1,4 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-8}$	$1,9 \cdot 10^{-8}$	$3,5 \cdot 10^{-9}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$
24,0	Почва	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,9 \cdot 10^{-8}$	$1,9 \cdot 10^{-9}$	$5,8 \cdot 10^{-10}$	$6,8 \cdot 10^{-9}$
	Растительность	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$

Примечание: Выбросы НТО в год из трубы высотой 30 м составили: 1980 г. – $8,7 \cdot 10^3$ Ки; 1981 г. – $4,55 \cdot 10^3$ Ки; 1982 г. – $4,36 \cdot 10^3$ Ки; 1983 г. – $5,95 \cdot 10^3$ Ки; 1984 – $6,62 \cdot 10^3$ Ки.

Таблица 3.3

Содержание НТО в снеговом покрове, Ки/м²

Расстояние от источника, км		1980	1981	1982	1983	1984
До 15	Среднее	$7,3 \cdot 10^{-7}$	$<3 \cdot 10^{-7}$	$4,3 \cdot 10^{-7}$	$3,3 \cdot 10^{-7}$	$<2,0 \cdot 10^{-7}$
	Максимальное	$1,4 \cdot 10^{-6}$	–	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$9,6 \cdot 10^{-7}$	–
До 30	Среднее	$7,2 \cdot 10^{-7}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$	$2,9 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-7}$	$<2,0 \cdot 10^{-7}$
	Максимальное	$7,1 \cdot 10^{-6}$	$5,2 \cdot 10^{-7}$	$7,3 \cdot 10^{-7}$	$3,9 \cdot 10^{-7}$	$<2,0 \cdot 10^{-7}$

Плотность выпадения НТО при наличии источника выброса выше естественной плотности выпадения. При этом объемная активность НТО в пробах снега составила от $2,0 \cdot 10^{-9}$ Ки/л до $4,0 \cdot 10^{-8}$ Ки/л.

За период с 1980 по 1984 годы изучено содержание НТО в воде открытых водоемов (прудов) на различных расстояниях от источника выброса (табл. 3.4).

Таблица 3.4

Содержание НТО в водоемах Ки/л

Расстояние от источника, км	1980	1981	1982	1983	1984
1,0	$3,8 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$<1,0 \cdot 10^{-8}$	$9,9 \cdot 10^{-8}$	$5,5 \cdot 10^{-8}$
3,0	$3,6 \cdot 10^{-8}$	$<1,0 \cdot 10^{-8}$	$<1,0 \cdot 10^{-8}$	$5,1 \cdot 10^{-9}$	$6,0 \cdot 10^{-9}$
8,0	$4,0 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{-8}$	$<1,0 \cdot 10^{-8}$	$7,1 \cdot 10^{-9}$	$<5,0 \cdot 10^{-9}$
12,0	$3,0 \cdot 10^{-8}$	$<1,0 \cdot 10^{-8}$	$<1,0 \cdot 10^{-8}$	$<2,0 \cdot 10^{-9}$	$<5,0 \cdot 10^{-9}$

Исследовалось поступление НТО из загрязненной почвы в овощные культуры. На поле диаметром 24 м вносили 7600 л дистиллированной воды с содержанием НТО 0,27 Ки/л ($\sim 4,5 \text{ Ки/м}^2$). Содержание НТО в корнеплодах картофеля на 40-е сутки составило $1,7 \cdot 10^{-3}$ Ки/кг, в моркови и свекле на 94-е сутки – $0,2 \cdot 10^{-3}$ Ки/кг. Экспериментальные результаты по содержанию НТО в овощных культурах, выращенных на загрязненной почве, могут быть использованы для оценки поступления НТО в организм человека по пищевым цепочкам.

Результаты измерений содержания трития в пище человека представлены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Тритий в пище и человеке г. Акита (Япония)

Вид пробы	Тритий в свободной воде пробы, Бк/л	Органически связанный тритий (ОСТ), Бк/л	Суточное поступление трития, Бк/сутки
Сырая пища:			
– рис	2,5	1,8	0,279
– овощи	1,0–1,4	1,7–1,8	0,307
– рыба, малюски	0,49	1,0	0,055
– мясо	1,3	1,8	0,094
– молоко	2,0	2,1	0,241
– яйца	1,7	2,1	0,068
Водопроводная вода	1,9	–	2,25
Суточное поступление:			
– человек	1,7	1,9	
– мозг	1,6	1,7	
– легкие	1,6	1,9	
– печень	1,6	1,8	

На основании этих исследований было определено, что общее суточное поступление трития у японца составляет 4,95 Бк, из которых 1,7 Бк относится к пище, 0,4 Бк к водяному пару и 2,25 к питьевой воде.

Согласно табл. 3.5 количество Т в воде человека (43 кг жидкости) составляет 1,6 Бк/л и ОСТ в мягкой ткани – 1,8 Бк/кг. При равномерном распределении в мягкой ткани человека (63 кг) концентрация трития составляет 1,67 Бк/кг, тогда в существующей окружающей среде японцы будут облучаться тритием в дозе, равной 0,048 мкЗв/год (4,8 мкБэр/год) [22].

Оксид Т могут накапливать не только продукты, выращенные на зараженной местности, но и «чистые» продукты, хранящиеся в атмосфере, загрязненной НТО. Поступление НТО в продукты будет происходить за счет обмена атмосферной влаги, содержащей НТО, и воды, содержащейся в продуктах [7]. Скорость накопления активности НТО (dA/dt) в продуктах составляет:

$$\frac{dA}{dt} = kq - kf \frac{A}{m}, \quad (3.1)$$

где k – относительная скорость сорбции НТО продуктами; q – концентрация НТО в воздухе; f – абсолютная влажность воздуха; m – содержание H_2O в продуктах при влажности f .

Решив (3.1) при $t = 0, A = 0$ и введя обозначение $T_{0,5} = 0,693 m/fk$ – время, в течение которого содержание НТО в воде продуктов питания достигает 50 % содержания НТО в атмосферной влаге, получим:

$$A_t = mC_{НТО} \left[1 - \exp \left(\frac{-0,693t}{T_{0,5}} \right) \right], \quad (3.2)$$

где $C_{НТО} = q/f$ – содержание НТО в воде атмосферного воздуха.

Значения k и $T_{0,5}$ определены экспериментально (табл. 3.7).

Из табл. 3.6 видно, что $T_{уст.}$ для большинства продуктов невелико и значительно меньше времени их фактического хранения до потребления.

Т а б л и ц а 3.6

Сорбция НТО продуктами питания

Продукты питания	Содержание влаги m , мг/г	k , Ки/г·ч на 1 КиНТО в воздухе	$T_{0,5}$, ч	$T_{уст.}^*$, ч
Хлеб	400	5,76	37	160
Мясо	720	10,8	85	150
Картофель	740	0,45	1060	4590
Рис	150	1,71	47	210
Манная крупа	90	0,9	42	180
Яблоки	750	0,57	840	3630
Сахар	80	0,54	98	430

Примечание: * $T_{уст.}$ – время, в течение которого содержание НТО в воде пищевых продуктов достигает 95 % содержания НТО в атмосферной влаге ($T_{уст.} = 4T_{0,5}$).

Произведена оценка поступления НТО в организм человека с учетом количества потребления продуктов, содержания воды в них и степени насыщения продуктов НТО из атмосферного воздуха. Оценка поступления показывает, что вследствие сорбции НТО продуктами питания в организм человека поступают около 50 % инкорпорированной НТО, и только 18 % НТО поступает ингаляционно [7].

Облучение населения за счет трития

Для оценки радиационной опасности выбрасываемых в атмосферу радиоактивных веществ (в том числе трития и НТО) необходимо знать концентрацию радионуклида в приземном слое воздуха. Этот параметр является определяющим при оценке поступления радионуклида в организм как ингаляционно, так и по пищевым цепочкам. Для практических расчетов приземных концентраций примеси, выбрасываемых из труб, наибольшее распространение получили теории Сэттона и Пасквила [23, 24].

Практические расчеты удобно проводить с помощью единого коэффициента, связывающего мощность выброса и концентрацию примеси. Этот коэффициент, связывающий выброс и концентрацию, получил название коэффициента турбулентного разбавления (G). По физическому смыслу коэффици-

ент G характеризует объем атмосферного воздуха, в котором разбавляется примесь в единицу времени:

$$G = \frac{Q}{X}, \quad (4.1)$$

где G имеет размерность $\text{м}^3/\text{с}$; Q – мощность выброса, $\text{Ки}/\text{с}$; X – концентрация примеси в данной точке, $\text{Ки}/\text{м}^3$.

Измерения, выполненные в окрестностях завода Саванна Ривер (США) показали, что повышенное содержание НТО обнаруживается в атмосфере на расстоянии до 160 км от источника выброс (табл. 4.1).

Т а б л и ц а 4.1

Активность НТО в атмосферной влаге, $\text{Ки}/\text{мл}$ при различной скорости выброса

Место отбора проб	1974 ($3 \cdot 10^{-2}$ Ки/с)	1975 ($1,6 \cdot 10^{-2}$ Ки/с)	1977 ($1,4 \cdot 10^{-2}$ Ки/с)
10 км от источника	$1,2 \cdot 10^{-12}$	$8,9 \cdot 10^{-12}$	$6,5 \cdot 10^{-12}$
40 км от источника	$4,9 \cdot 10^{-12}$	$4,8 \cdot 10^{-12}$	$1,9 \cdot 10^{-12}$
160 км от источника	–	–	$8,1 \cdot 10^{-12}$

При этом зависимость концентрации НТО в воздухе от расстояния до трубы в логарифмическом масштабе представляет прямую линию [14].

Учитывая, что заводом Саванна Ривер $\sim 50\%$ трития выбрасывается в форме НТО и принимая содержание влаги в воздухе $10 \text{ г}/\text{м}^3$ (влажность воздуха $\sim 50\%$), получим (по данным табл. 4.1) средние коэффициенты метеорологического разбавления НТО за 1974–1977 гг., равные $1,05 \cdot 10^8$; $2,8 \cdot 10^8$ и $8,3 \cdot 10^8 \text{ м}^3/\text{с}$ для 10, 40 и 160 км от источника соответственно.

Значения коэффициентов метеорологического разбавления экспериментально определены для источника выброса трития ($H = 30 \text{ м}$) на предприятии по переработке трития. По результатам пятилетнего периода наблюдений получено, что среднегодовые коэффициенты разбавления для расстояний 1,5 и 3,0 км от источника составляют $(2,1 \pm 0,5) \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$ и $(3,9 \pm 0,8) \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$ соответственно.

Значения коэффициентов метеорологического разбавления, полученные экспериментально в США и РФ, хорошо согласуются с теорией Пасквила, которую можно рекомендовать для оценки радиационной обстановки на местности.

Глобальное накопление T в настоящее время не представляется сколь-нибудь угрожающим. При естественном содержании НТО в атмосфере $2 \cdot 10^{-15} - 10^{-14} \text{ Ки}/\text{л}$, доза облучения населения составляет 0,03–0,15 мбэр/год. Это не превышает 0,1 % средней дозы облучения за счет естественного фона. С ростом мощности АЭС со 120 ГВт (эл.) в 1980 году до 720 ГВт (эл.) в 2000 году доза облучения населения земного шара за счет трития увеличилась в 2 раза [14].

Однако, уже в настоящее время дозы облучения населения, проживающего в районах предприятий атомной промышленности, выше указанной величины. Так вблизи АЭС Канады дозы облучения населения составляют 0,2...0,8 мбэр/год [14]. В районе расположения завода по переработке ядерного топлива в Буффало (США) приземная концентрация трития достигала $2,6 \cdot 10^{-13} \text{ Ки}/\text{л}$, что соответствует дозе облучения населения около 4 мбэр/год [7]; дозовый фактор составляет $1,5 \cdot 10^{13} \text{ мбэр} \cdot \text{л}/\text{Ки} \cdot \text{год}$.

Исследовали дозы облучения населения вблизи источник выброса НТО (в радиусе ~ 3 км). Дозы облучения оценивали по содержанию трития в моче человека (табл. 4.2).

Т а б л и ц а 4.2

Дозы облучения населения на расстоянии 3 км от источника выброса трития

Население		Средняя концентрация НТО, Ки/л	Средняя доза облучения, мбэр/год	Дозовый фактор, мбэр·л/Ки·год
Взрослые	1	$1,2 \cdot 10^{-13}$	5,25	$4,410^{13}$
	2	$8,5 \cdot 10^{-14}$	2,20	$2,6 \cdot 10^{13}$
	3	$5,4 \cdot 10^{-14}$	1,30	$2,4 \cdot 10^{13}$
Дети	4	$1,2 \cdot 10^{-13}$	0,90	$0,8 \cdot 10^{13}$
	5	$1,7 \cdot 10^{-13}$	1,60	$0,9 \cdot 10^{13}$
Среднее		–	–	$2,2 \cdot 10^{13}$

Видно (табл. 4.2), что среднее значение дозового фактора ($2,2 \cdot 10^{13}$) удовлетворительно совпадают с данными США ($1,5 \cdot 10^{13}$).

Существующие экспериментальные данные позволяют сделать вывод о том, что через органы дыхания и кожу тела в организм человека поступает от 4 до 20% общего количества НТО [7, 14]. Следовательно, вклад этого источника поступления в дозу облучения населения незначителен и приземная концентрация НТО в воздухе не является определяющей при оценке дозы облучения. Вдыхание загрязненного воздуха вносит заметный вклад в дозу облучения только в тех случаях, когда доля употребляемой загрязненной пищи не превышает ~1% общего количества пищи [14]. Указанным обстоятельством и объясняется разброс в величине дозового фактора, который рассчитывают по приземной концентрации НТО.

Оценены возможные максимальные уровни облучения населения при нормальной эксплуатации термоядерного реактора и при авариях (табл. 4.3).

Т а б л и ц а 4.3

Максимальные дозы облучения населения при работе ИТЭР

Параметры радиационной обстановки	Выброс Т из ИТЭР	
	Постоянный $3,17 \cdot 10^{-3}$ Ки/с	Аварийный 10^5 Ки
Среднегодовая максимальная приземная концентрация, Ки/м ³	$2,53 \cdot 10^{-10}$	–
Максимальная интегральная концентрация, Ки·с/м ³	$8,00 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-1}$
Плотность загрязнения местности, Ки/м ²	$2,70 \cdot 10^{-5}$	$6,8 \cdot 10^{-4}$
Максимальная доза облучения, бэр		
– аэрогенное поступление	$5,00 \cdot 10^{-4}$	$1,70 \cdot 10^{-2}$
– за счет загрязнения почвы (аэрогенное и по пищевым цепочкам)	$1,20 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$
Суммарная доза, бэр	$1,70 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-2}$

В соответствии с нормами радиационной безопасности допустимая доза облучения населения составляет 1 мЗв в год (0,1 бэр в год). При вы-

бросе 10^5 Ки/год через трубу высотой 100 м доза облучения населения от всех путей поступления НТО составляет 1,7 мБэр, т.е. ниже установленной нормы.

В работе [21] приведены уровни воздействия трития на окружающую среду и человека в условиях перехода на термоядерную энергетику (ИТЭР) в мире. Приведена оценка выбросов трития из установок термоядерной энергетики для гипотетической модели развития мирового сообщества на конец 21 века при численности населения 12 млрд. человек и энергопотребления 10кВт (тепл.) год/чел. Предполагается, что 50 % электроэнергии производится на термоядерных установках с выработкой первичной тепловой энергии 1,25 кВт (тепл.) год/чел ($1,5 \cdot 10^{10}$ кВт (тепл.) год). За прототип выбран термоядерный реактор ИТЭР мощностью (тепл.) $1,5 \cdot 10^3$ МВт.

В реакторе ИТЭР при каждом разряде продолжительностью 1000 с сгорает 3,0 г трития [2]. При средней продолжительности работы реактора 1000 ч в год суммарное потребление трития при производстве $1,5 \cdot 10^{10}$ кВт (тепл.) год, составит 760 т/год. В настоящее время безвозвратные потери трития, за счет утечек в газообразной (DT) и паровой (DTO) форме составляют 0,5–5,0 %. Предполагая, что в 2100 году выбросы в атмосферу не будут превышать уровня 0,5 % от используемого в термоядерном цикле (наработка, производство, сжигание) и равновесное содержание трития в атмосфере и биосфере Земли, при ежегодных выбросах 3,8 т/год составит 67 т или $2,5 \cdot 10^{22}$ Бк ($6,7 \cdot 10^{11}$ Ки). При этих условиях усредненная годовая доза облучения населения земного шара при производстве энергии 2,5 кВт (тепл.) год/чел. будет составлять 0,1–0,2 мЗв чел./год, т.е. естественный радиационный фон на Земле увеличивается на 10–20 %. На расстоянии 5...10 км от источника выброса (термоядерного реактора) доза облучения населения будет в 10 и более раз превышать средние уровни (более 1,0–2,0 мЗв чел./год). При этом 80–90 % дозы облучения будет определяться пищевыми продуктами и, для ограничения облучения населения возникает необходимость изъятия больших площадей сельхозугодий, что недопустимо, особенно в странах с большой плотностью населения.

Следует отметить, что при оценке дозы облучения населения не учитывалось поступление трития в биосферу с твердыми отходами, вопросы безопасного хранения которых, в настоящее время, также представляют нерешенную проблему. С учетом вышесказанного можно утверждать, что для полномасштабного внедрения термоядерной энергетики необходимо дальнейшее снижение газообразных выбросов трития в атмосферу до 0,1 % и менее от перерабатываемого (используемого) количества. Однако, уже при существующих передовых технологиях работ с большим количеством трития можно считать вполне приемлемым использование термоядерной энергетики для производства электроэнергии, поскольку существующие системы очистки вентиляционных выбросов позволяют снижать выброс Т до 0,01 % и менее [25].

Заключение

Представленные материалы основаны на анализе и обобщении публикаций отечественных и зарубежных авторов. Они свидетельствуют о том, что в настоящее время глобальное накопление трития не представляется сколь-нибудь угрожающим.

Исходя из предположения, что в 2100 г. 50 % электроэнергии будет вырабатываться на термоядерных реакторах (ИТЭР), выбросы трития увеличат естественный радиационный фон на Земле на 10–20 %. На расстоянии 5–10 км от источника выброса (термоядерного реактора) доза облучения населения будет в 10 и более раз превышать средние уровни (более 1,0–2,0 мЗв чел./год). Поэтому для полномасштабного внедрения термоядерной энергетики необходимо дальнейшее снижение газообразных выбросов трития в атмосферу до 0,1 % и менее от перерабатываемого количества.

Список литературы

1. Крюков С. В. Проект ИТЭР, Физическое обоснование и конструкция (обзор). Атомная техника за рубежом. 1996, № 3. С. 3–10.
2. Proceedings of the ninth International conference on tritium science and technology. Nara, Japan, October 24–29, 2010 // Fusion Science and Technology. 2010. Vol. 60, No. 3. P. 855 – 876.
3. Соглашение между европейским сообществом по атомной энергии, правительством РФ, правительством США и правительством Японии о сотрудничестве в разработке технического проекта международного термоядерного реактора, ноябрь 1992 г.
4. Shigefami Okada and Noniyki Momoshima, Overview of tritium: Characteristics, sources and problems // Health Phys. 1993. Vol. 65, № 6. P. 565–608.
5. Robin L., Hilland Yohn R. Yohnson. Metabolism and Dosimetry of tritium // Health Phys. 1993. Vol. 65, № 6. P. 628–647.
6. Юзгин В. С. Явелов Б. Е. Тритий и окружающая среда // Атомная техника за рубежом. 1973, № 10. с. 24.
7. Беловодский Л. Ф., Гаевой В. К., Гришмановский В. И. Тритий, М.: Энергоиздат, 1985.
8. Ядерная энергетика, человек и окружающая среда (Н. С. Бабаев, Л. А. Ильин, В. А. Легасов и др.), 2-е издание. М.: Энергоатомиздат, 1984.
9. Романов Г. И. Поведение в окружающей среде и биологическое действие трития. Аналитический обзор. М.: ЦНИИАтоминформ, 1983.
10. Пономарев Л. И. Синтез и деление ядер как основа будущей энергетики. Сборник докладов Второго Международного семинара «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами IHISM-04» (г. Саров, 2004). Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005.
11. Fusion Safety Status Report, IAEA–TECDOC, 1986. ДОР НИКИЭТ № 1(553), 1989 г.
12. Санитарные правила СП 2.6.1 05-04 «Радиационная безопасность при работе с тритием и его соединениями (СП РБ –РТС – 04). М. ИБФ МЗ РФ, 2004 г.
13. Сивинцев Ю. В. Экологические проблемы термоядерной энергетики // Атомная техника за рубежом. 1980, № 12. С.12.
14. Behavior of tritium in the Environment. Proc. of the Sympos. San Fr. 1978, Vienna, IAEA, 1979 г.
15. Боболевич Б. Н. К вопросу о безопасности окружающей среды при подземных ядерных взрывах // Атомная техника за рубежом. 1973, № 9. С.26.

16. Third Topical Meeting. Tritium // Fusion Technology. 1988. Vol. 14, № 2.
17. Biosphere Modelling and Assessment (BIOMASS) programme, version β 2, IAEA, Vienna, 2001 г.
18. Алейников А. Ю., Беловодский Л. Ф., Голубев А. В. и др. Моделирование кинетики и механизма вымывания окиси трития из атмосферы / В сб. Потенциал Российских ядерных центров и МНТЦ в тритиевых технологиях. Международный семинар. ВНИИЭФ, г. Саров, 17-21 мая 1999. с. 143.
19. Беловодский Л. Ф., Верещага А. Н., Голубев А. В. и др. Моделирование ремиссии НТО из почвы в атмосферу в окрестности постоянного источника трития // Там же. С. 147.
20. Беловодский Л. Ф., Верещага А. Н., Голубев А. В. и др. Модель дисперсии трития грунтовыми водами // Там же. С. 153.
21. Беловодский Л. Ф., Гаевой В. К., Илькаев Р. И., Петрин С. В. О тритиевой опасности термоядерных установок // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 1999. Вып. 2. С. 3–8.
22. Беловодский Л. Ф., Гаевой В. К., Гришмановский В. И., Голубев А. В. и др. Радиационные и экологические аспекты при работе с тритием. 9-я Тихоокеанская ядерная конференция «Ядерная энергия, наука, технология – мирное сотрудничество», Сидней, Австралия, 1-6 мая 1994 г.
23. Туркин А. Д. Дозиметрия радиоактивных газов. М.: Атомиздат, 1968.
24. Эйзенбад М. Радиоактивность внешней среды, М.: Атомиздат, 1968.
25. Беловодский Л. Ф., Хапов А. С. Очистка газов от трития // Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2013. С. 216–260.