УДК 621.039 10.56564/27825264_2026_1_31

ПОСТУПЛЕНИЕ ТРИТИЯ В ОРГАНИЗМ, ОБУСЛОВЛЕННОЕ ВЫБРОСАМИ И СБРОСАМИ ПРИ НОРМАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ АЭС

Д. Д. Десятов

Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Статья открывает цикл публикаций, который посвящен совершенствованию методов оценки воздействия трития (Т) на организм при нормальной эксплуатации АЭС. В данной статье на основе методологии НКДАР ООН выполнена оценка поступления Т в организм человека. Рассмотрены три источника поступления Т: выбросы в атмосферу; сбросы в пресные водоемы; сбросы в моря и океаны. Выполнен расчет содержания Т в компонентах различных сред от единичного выброса и сброса АЭС. Рассчитаны годовые активности Т при поступлении в организм взрослого человека. Оценен вклад в годовое поступление Т в организм взрослого человека по различным путям от трех рассмотренных источников. Наибольшее поступление Т в организм от выбросов обусловлено потреблением овощей (57,8 %), от сбросов в пресные водоемы –питьевой воды (93,7 %), от сбросов в моря и океаны – рыбы (41 и 67,6 % для локального и регионального водоема соответственно).

Ключевые слова: тритий; активность трития; нормальная эксплуатация АЭС; выбросы АЭС; сбросы АЭС; поступление трития; НКДАР ООН.

1. Введение

Атомная энергетика занимает ключевую роль в структуре всего мирового топливно-энергетического баланса. Доля выработки электроэнергии АЭС на сегодняшний день составляет ~9–10 % [1, 2]. Доля АЭС в суммарной выработке электроэнергии максимальна в следующих странах: Франция (67,3 %), Словакия (60,6 %) и Венгрия (47,1 %) [2]. При этом доля электроэнергии, производимой на АЭС в большинстве стран, не превышает 30 %. По состоянию на 2026 г. в мире эксплуатируется 413 реакторных установок (РУ) с суммарной электрической мощностью 377,1 ГВт [2].

Нормальная эксплуатация АЭС неизбежно приводит к поступлению радионуклидов в окружающую среду [3, 4]. Для обеспечения безопасности персонала, населения и окружающей среды при нормальной эксплуатации АЭС необходим обязательный контроль радионуклидов в выбросах и сбросах. Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) рекомендует контролировать на АЭС 29 радионуклидов в выбросах и 31 радионуклид в сбросах [5]. В данном перечне радионуклидов присутствует радиоактивный изотоп водорода – тритий (^{3}H или Т). Выбросы и сбросы Т контролируются на всех АЭС ведущих стран мира, включая Россию [6–11]. По данным отчетов АО «Концерн Росэнергоатом» [6], Европейского сообщества по атомной энергии [7] и Комиссии по ядерному регулированию США [8], вклад Т в суммарную активность в сбросах составляет не менее 99 % для всех РУ. Однако вклад Т в суммарную активность в выбросах для различных типов РУ существенно отличается и составляет от 3 до 80 % [6–9]. Выбросы Т формируются как организованными, так и неорганизованными источниками, такими как брызгальные бассейны [10], однако оценка выброса от таких источников требует отдельных исследований и в рамках данной статьи не рассматривается. При нормальной эксплуатации АЭС тритий может входить в состав твердых радиоактивных отходов (ТРО), но этот путь выхода (ТРО) за барьеры безопасности АЭС не рассматривается при оценке радиационного воздействия вследствие пренебрежимо малого вклада в дозу [11]. Предполагается, что вовлечение гражданских (коммерческих) энергоблоков АЭС в выполнение планов интенсивной наработки Т для военных целей, вероятно,

приведет к увеличению его поступления в атмосферу, водные объекты и увеличит количество ТРО, содержащих Т [12].

Тритий – один из основных дозообразующих радионуклидов [13–16]. По оценкам [17], годовая доза от выброса трития АЭС с ВВЭР для критической группы населения находится в диапазоне 0,015–0,09 мкЗв, что значительно ниже минимально значимой дозы. Тритий определяет локальную радиационную обстановку в районе расположения АЭС, а за счет периода полураспада в 12,3 года и переноса воздушными и водными потоками на значительные расстояния считается глобальным радионуклидом.

Естественное содержание Т в окружающей среде, обусловленное взаимодействием космогенных нейтронов и протонов с атомами азота и кислорода, находится в равновесии и оценивается от $9{,}0 \cdot 10^{17}$ до $2{,}6 \cdot 10^{18}$ Бк [4, 18]. В результате окисления и изотопного обмена Т конвертируется в молекулы воды и через осадки выпадает на поверхность Земли, после чего вовлекается в круговорот воды [19]. Подавляющая часть (99 %) природного Т находится в воде океанов [19, 20], при этом происходит его перемешивание с глубинными водами [21]. Поведение техногенного Т при поступлении в окружающую среду соответствует естественному при среднем пребывании в атмосфере в виде тритиевой воды (НТО) 11 суток [21]. Поскольку Т становится частью молекулы воды, он следует за глобальным гидрологическим циклом и в конечном итоге оказывается в воде океанов [21, 22].

При поступлении в организм Т относительно равномерно распределяется по всем органам и тканям в виде НТО, а также в составе органических соединений в виде органически связанного трития (ОСТ) (или ОВТ в иностранной литературе) [23]. В организме Т вызывает мутагенные нарушения за счет β-излучения со средней энергией в 5,7 кЭв, а также нарушает молекулярные связи за счет образования изотопа ^{3}Не в результате распада трития [10, 24]. В модели международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) период полувыведения Т из человеческого организма в виде НТО составляет около 10 суток, ОСТ – от 40 суток до года [25].

Цель данной работы – оценить поступление Т в человеческий организм, обусловленное выбросами и сбросами при нормальной эксплуатации АЭС.

2. Материалы и методы

Для оценки поступления Т в организм человека использовали методологию (модель), разработанную Научным комитетом Организации Объединенных Наций по действию атомной радиации (НКДАР ООН), для расчета индивидуальных и коллективных доз от ключевых радионуклидов в выбросах и сбросах [22]. Данная методология основана на более ранних публикациях – 2000 г. [26] и 2008 г. [27].

Рассматриваются три пути поступления радионуклидов при штатной эксплуатации АЭС: выбросы в атмосферу, сбросы в пресные водоемы и сбросы в моря и океаны (при интенсивности поступления радионуклидов в окружающую среду от выбросов и сбросов в 1 Бк/с).

1. Пути поступления Т в организм от выбросов в атмосферу:

– ингаляционный: выбросы → облако → приземный слой атмосферы → легкие;

– пероральный 1: выбросы → облако → приземный слой атмосферы → почва → выращиваемые продукты питания → желудок;

– пероральный 2: выбросы → облако → приземный слой атмосферы → почва → корм для животных → мясные продукты питания → желудок.

2. Пути поступления Т в организм от сбросов в пресные водоемы:

– пероральный 1: сбросы → пресные водоемы → рыба → желудок;

– пероральный 2: сбросы → пресные водоемы → питьевая вода → желудок;

– пероральный 3: сбросы → пресные водоемы → сбор воды для орошения → почвенная влага→ выращиваемые продукты питания → желудок.

3. Пути поступления Т в организм от сбросов в моря и океаны:

– пероральный 1: сбросы → локальный водоем → региональный водоем → морская рыба в водоеме → желудок;

– пероральный 2: сбросы → локальный водоем → региональный водоем → моллюски и ракообразные на береговой линии → желудок.

Для выбросов в атмосферу характерна пространственная дисперсия, которая выражена функцией расстояния от точки выброса:

$$C_a(x) = D_1 \cdot Q \cdot x^{-n}, \quad (1)$$

где C_a – объемная активность радионуклида в приземном слое воздуха на расстоянии x от источника выброса, Бк/м^3;

D_1 – среднегодовой фактор разбавления (равный $5{,}3 \cdot 10^{-7}$ с/м^3) на расстоянии 1 км для нейтральной категории устойчивости атмосферы, сплошной облачности и умеренного ветра;

Q – интенсивность выброса, равная 1 Бк/с;

n – эмпирический коэффициент, характеризующий скорость разбавления облака по мере удаления радионуклида от источника (для Т – 1,2).

При расчете поступления Т в организм от сбросов в водоемы функция расстояния от точки сброса не используется:

$$C_w = \frac{\mathrm{Q}}{F \cdot 1000}, \quad (2)$$

где C_w – удельная активность радионуклида в водоеме, Бк/л;

Q – интенсивность сброса, равная 1 Бк/с;

F – расход воды, равный 1000 м^3/с, для большого водоема и 10 м^3/с для малого;

1000 – коэффициент перехода, л/м^3.

Формулы для расчета содержания Т в компонентах среды приведены в Приложении. В методологии расчета содержания Т в различных компонентах среды учитываются соединения Т в живых организмах – НТО и ОВТ. Годовоге поступление Т в организм рассчитывали путем произведения содержания Т (в случае учета НТО и ОСТ в одном и том же компоненте удельные активности (УА) суммировались) в соответствующем компоненте на годовое потребление продуктов (в случае перорального поступления) и на интенсивность дыхания (для ингаляционного поступления). Параметры годового потребления продуктов и интенсивность дыхания взяты исходя из среднемировых значений для взрослого человека. В отличие от консервативного подхода, где не учитывается доля привозной продукции, данная методология предполагает, что человек потребляет как местные продукты питания (их доля составляет 25 %), так и привозную продукцию (75 %). В случае сбросов в пресноводные водоемы модель предполагает 100 % долю потребления питьевой воды из принимающего водоема.

Полученные оценки содержания Т в компонентах среды при единичной интенсивности выбросов и сбросов (1 Бк/с) можно использовать для более корректных расчетов исходя из реальных значений интенсивности и текущих практик.

3. Результаты

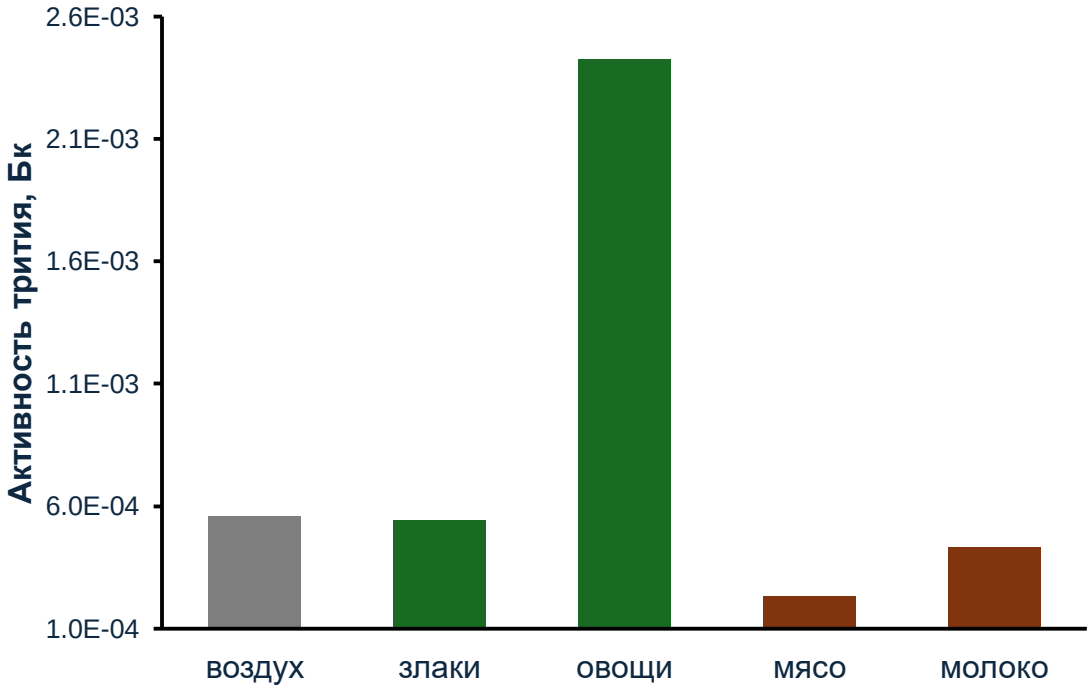
В табл. 1 приведены результаты расчета содержания трития в компонентах среды при непрерывных выбросах интенсивностью в 1 Бк/с на расстоянии 5 км от точки выбросов.

Таблица 1. Содержание трития в компонентах среды при выбросе

Параметр	Значение параметра	Путь поступления
Объемная активность Т в воздухе, Бк/м^3	$7{,}68 \cdot 10^{-8}$	выбросы → приземный слой атмосферы
УА НТО в почвенной влаге, Бк/л	$3{,}84 \cdot 10^{-6}$	приземный слой атмосферы → почвенная влага
УА НТО в пище, Бк/кг	злаки – $1{,}34 \cdot 10^{-6}$ овощи – $1{,}02 \cdot 10^{-5}$ корм для животных – $8{,}46 \cdot 10^{-6}$	почвенная влага → выращиваемые продукты питания
УА ОВТ в пище, Бк/кг	злаки – $2{,}96 \cdot 10^{-6}$ овощи – $2{,}45 \cdot 10^{-7}$ корм для животных – $8{,}08 \cdot 10^{-7}$	
УА НТО в пище животного происхождения, Бк/кг	молоко – $6{,}51 \cdot 10^{-6}$ мясо – $4{,}96 \cdot 10^{-6}$	выращиваемые продукты питания (корм для животных) → продукты животного происхождения
УА ОВТ в пище животного происхождения, Бк/кг	молоко – $1{,}94 \cdot 10^{-7}$ мясо – $3{,}23 \cdot 10^{-7}$	

Удельная активность НТО в злаках превышает УА ОВТ во всех компонентах, за исключением злаковых, ввиду малого содержания внутри них воды. Максимальное содержание Т в овощах – $1{,}04 \cdot 10^{-5}$ Бк/кг.

На рис. 1 представлено годовое поступление Т в организм взрослого человека по различным путям от выбросов АЭС (на расстоянии 5 км и интенсивности выброса в 1 Бк/с).



- Рис. 1. Годовое поступление Т в организм взрослого человека по различным путям от выбросов АЭС

Суммарное годовое поступление Т от выбросов АЭС (при интенсивности 1 Бк/с) в организм взрослого человека – $4{,}19 \cdot 10^{-3}$ Бк. Основной вклад в годовое поступление Т в организм человека от выбросов АЭС вносят продукты питания ($3{,}63 \cdot 10^{-3}$ Бк или 86,6 %), при этом: овощи – 66,8 %, злаки – 14,9 %, молоко – 11,9 %, мясо – 6,4 %.

В табл. 2 приведены результаты расчета содержания Т в компонентах среды при непрерывном сбросе интенсивностью в 1 Бк/с в малые пресные водоемы.

Таблица 2. Содержание трития в компонентах среды при сбросе в малые пресные водоемы

Параметр	Значение параметра	Путь поступления
УА Т в водоемах, Бк/л	$1{,}00 \cdot 10^{-4}$	сбросы → пресные водоемы
УА НТО в рыбе, Бк/л	$7{,}80 \cdot 10^{-5}$	пресные водоемы → рыба
УА ОВТ в рыбе, Бк/л	$9{,}44 \cdot 10^{-6}$	
УА НТО в почвенной влаге при орошении, Бк/л	$4{,}44 \cdot 10^{-5}$	пресные водоемы → орошение почвы
УА НТО в выращиваемых продуктах при орошении, Бк/кг	злаки – $5{,}87 \cdot 10^{-6}$ овощи – $4{,}50 \cdot 10^{-5}$	орошение почвы → выращиваемые продукты питания
УА ОВТ в выращиваемых продуктах при орошении, Бк/кг	злаки – $1{,}30 \cdot 10^{-5}$ овощи – $1{,}08 \cdot 10^{-6}$	
УА НТО в питьевой воде, Бк/л	$1{,}00 \cdot 10^{-4}$	пресные водоемы → питьевая вода

Максимальное содержание Т при сбросе в малые пресные водоемы устанавливается в питьевой воде – $1{,}00 \cdot 10^{-4}$ Бк/л.

На рис. 2 представлено годовое поступление Т в организм взрослого человека по различным путям от сбросов АЭС в малые пресные водоемы (при интенсивности выброса в 1 Бк/с).

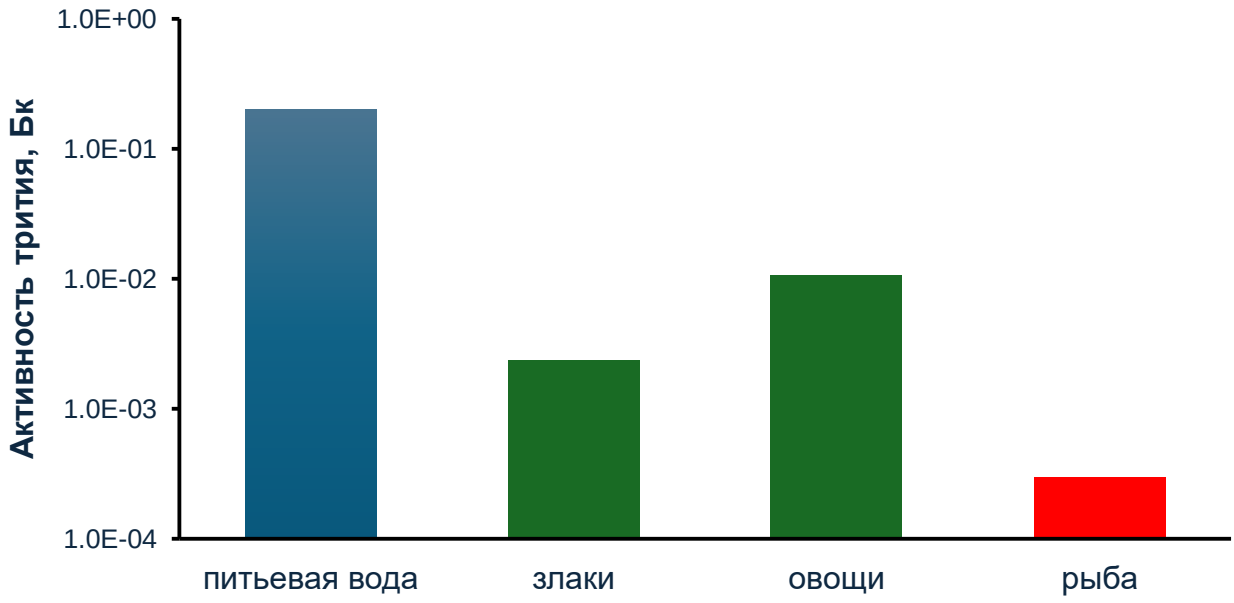


Рис. 2. Годовое поступление Т в организм взрослого человека по различным путям от сбросов АЭС в малые пресные водоемы

Суммарное годовое поступление Т от сбросов АЭС в малые пресные водоемы (при интенсивности 1 Бк/с) в организм взрослого человека – $2{,}13 \cdot 10^{-1}$ Бк. Основной

вклад в годовое поступление Т в организм взрослого человека от сбросов АЭС в малые пресные водоемы вносит питьевая вода (0,2 Бк, или 93,7 %), рыба вносит пренебрежимо малый вклад (0,1 %). При этом распределение вклада продуктов питания: овощи – 80,0 %, злаки – 17,8 %, рыба – 2,2 %.

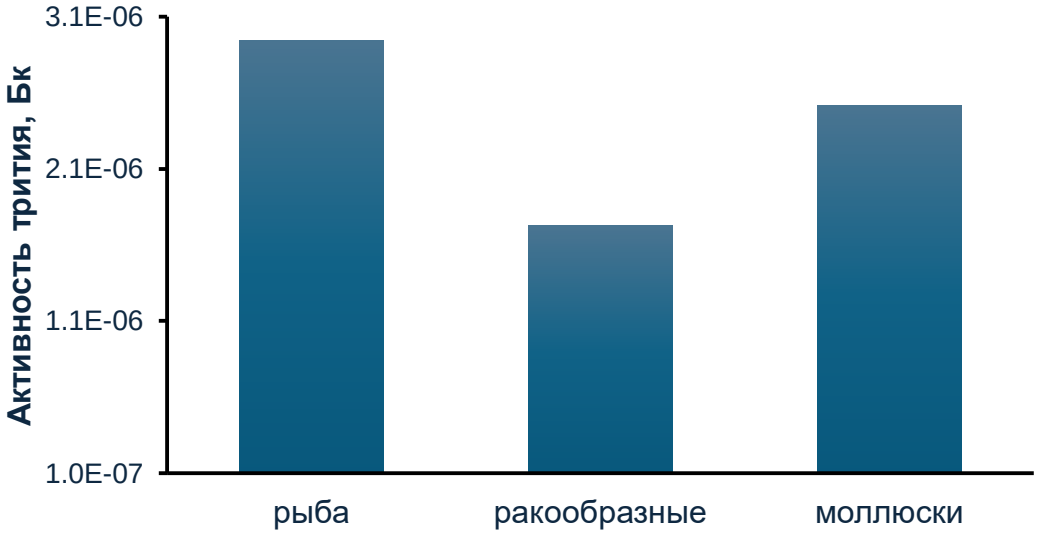
В табл. 3 приведены результаты расчета содержания Т в компонентах среды при непрерывных сбросах интенсивностью в 1 Бк/с в локальные и региональные морские водоемы.

Таблица 3. Содержание трития в компонентах среды при сбросах в морские водоемы

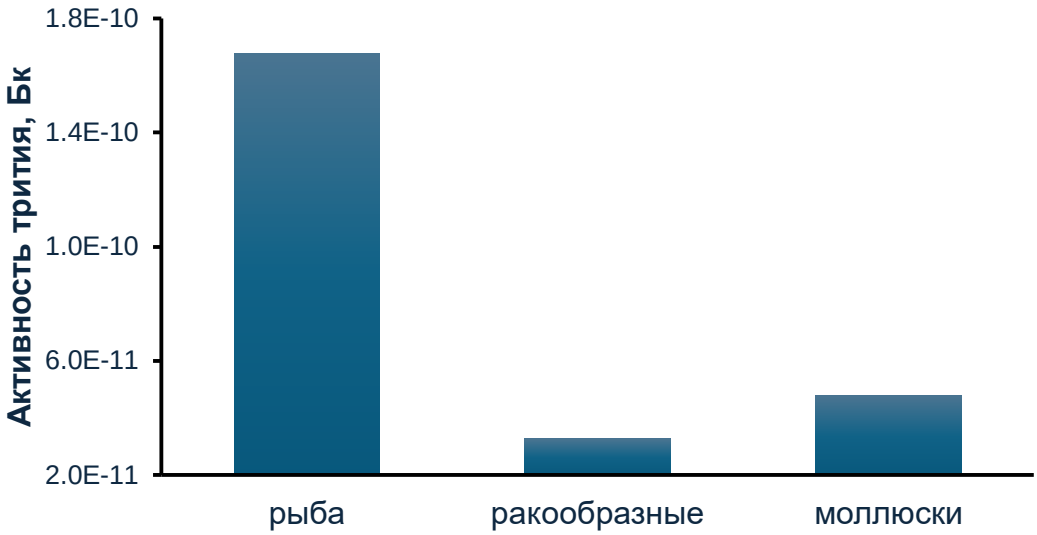
Параметр	Значение параметра	Путь поступления
УА НТО в локальных водоемах, Бк/л	$1{,}57 \cdot 10^{-6}$	сбросы → локальные водоемы
УА НТО в региональных водоемах, Бк/л	$2{,}98 \cdot 10^{-11}$	локальные водоемы → региональные водоемы
УА НТО в морепродуктах в локальных водоемах, Бк/л	рыба – $1{,}57 \cdot 10^{-6}$ ракообразные – $1{,}57 \cdot 10^{-6}$ моллюски – $1{,}57 \cdot 10^{-6}$	локальные водоемы → морепродукты
УА НТО в морепродуктах в региональных водоемах, Бк/л	рыба – $2{,}98 \cdot 10^{-11}$ ракообразные – $2{,}98 \cdot 10^{-11}$ моллюски – $2{,}98 \cdot 10^{-11}$	региональные водоемы → морепродукты

Содержание Т в морепродуктах в региональных водоемах практически в 29 тыс. раз ниже содержания Т в морепродуктах в локальных водоемах из-за большого разбавления активности в региональных водоемах.

На рис. 3 представлено годовое поступление Т в организм взрослого человека по различным путям от сбросов АЭС в локальные и региональные морские водоемы (при интенсивности выброса в 1 Бк/с).



(а)



(б)

Рис. 3. Годовое поступление Т в организм взрослого человека по различным путям от сбросов АЭС в локальные (а) и региональные (б) морские водоемы

Суммарное годовое поступление Т от сбросов АЭС в локальные морские водоемы (при интенсивности 1 Бк/с) в организм взрослого человека – $7{,}18 \cdot 10^{-6}$ Бк, от сбросов в региональные морские водоемы – $2{,}48 \cdot 10^{-10}$ Бк. Разница в долях годового поступления Т в организм от рыбы, ракообразных и моллюсков для локальных и региональных водоемов обусловлена соответствующей долей потребления населением морепродуктов местного улова.

4. Обсуждение

На основе методологии НКДАР ООН были рассчитаны значения годового поступления Т (в Бк) в организм взрослого человека при штатной эксплуатации АЭС с интенсивностью выбросов и сбросов в 1 Бк/с. Показано, что максимальное содержание Т от выбросов устанавливается в овощах, от сбросов в пресные водоемы – в воде, от сбросов в морские водоемы – в рыбе. Основной вклад в суммарное поступление Т в организм вносят сбросы в пресные водоемы. Суммарное годовое поступление Т в организм от сбросов АЭС в морские водоемы пренебрежимо мало.

Данная работа формирует научный задел для оценки доз, полученных организмом от выбросов и сбросов Т при штатной эксплуатации АЭС. Полученная доза будет зависеть от применяемых дозовых коэффициентов для отдельной когорты населения, региона проживания и количества потребляемой питьевой воды и продуктов питания.

5. Выводы

1. Оценено содержание Т в объектах окружающей среды при его атмосферных выбросах, сбросах в пресные водоемы, а также сбросах в локальные и региональные морские водоемы.
2. Суммарное годовое поступление Т от выбросов АЭС в организм взрослого человека – $4{,}19 \cdot 10^{-3}$ Бк, от сбросов в пресные малые водоемы – $2{,}13 \cdot 10^{-1}$ Бк, от сбросов в локальные и региональные морские водоемы – $7{,}18 \cdot 10^{-6}$ и $7{,}18 \cdot 10^{-11}$ Бк соответственно.
3. Пероральный путь вносит основной вклад в годовое поступление Т в организм взрослого человека от выбросов АЭС ($3{,}63 \cdot 10^{-3}$ Бк, или 86,6 %), на ингаляционный приходится 13,4 %.

4. При сбросах в малые пресные водоемы основной вклад в годовое поступление Т в организм взрослого человека вносит питьевая вода (0,2 Бк, или 93,7 %), в то время как рыба вносит пренебрежимо малый вклад (0,1 %).

5. Наибольший вклад в годовое поступление Т в организм взрослого человека от сбросов АЭС в морские водоемы вносит рыба (41,0 и 67,6 % для локальньных и региональных водоемов соответственно).

6. Полученные результаты расчета активности трития в организме взрослого человека от выбросов и сбросов АЭС при нормальной эксплуатации могут использоваться для оценки индивидуальных и коллективных доз.

6. Благодарности

Исследование выполнено за счет субсидий Минобрнауки РФ на выполнение научной темы FUMN-2024-0001.

Автор выражает благодарность научному руководителю, в. н. с., к. ф.-м. н. Алексею Акимовичу Екидину за предложенное направление в исследовании.

7. Список литературы

1. Крупномасштабная чистая энерготехнология будущего / Н. В. Горин, В. П. Кучинов, В. В. Шидловский, А. В. Моисеев // Траектория исследований – человек, природа, технологии. – 2023. – № 4 (8). – С. 2–11. – DOI 10.56564/27825264_2023_4_2. – EDN BLSTYT.
2. Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050. – URL: https://www.iaea.org/publications/15942/energy-electricity-and-nuclear-power-estimates-for-the-period-up-to-2050 (дата обращения: 11.03.2026).
3. *Молчанов, С. М.* Подготовка модельного раствора методом обратного осмоса / С. М. Молчанов, Д. Д. Десятов // Траектория исследований – человек, природа, технологии. – 2025. – № 1(13). – С. 28–50. – DOI 10.56564/27825264_2025_1_28. – EDN BDRYOY.
4. *Десятов, Д. Д.* Поступление радиоактивного цезия в окружающую среду при нормальной эксплуатации АЭС / Д. Д. Десятов, А. А. Екидин, С. Г. Голиборода // Атомная энергия. – 2023. – Т. 134, № 1–2. – С. 85–90. – EDN SRCIRE.
5. INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Environmental Impact of Stressors. – Vienna : International Atomic Energy Agency, 2016. — 108 p. — (IAEA Nuclear Energy Series ; no. NG-T-3.15). — URL: www.iaea.org (дата обращения: 05.03.2026).
6. Database (RADD). Nuclide Discharge Overview : official website / European Commission. – Brussels : European Union, 2026. – URL: https://europa.eu/radd/nuclideDischargeOverview.dox?pageID=NuclideDischargeOverview (дата обращения: 11.03.2026).
7. Экологические отчеты АО «Концерн Росэнергоатом» // Росэнергоатом : [официальный сайт]. – URL: https://www.rosenergoatom.ru/safety_environment/vozdeystvie-na-okruzhayushchuyu-sredu/ekologicheskie-otchety-ao-kontsern-rosenergoatom/ (дата обращения: 11.03.2026).
8. Tritium Release Reports : official website / U.S. Nuclear Regulatory Commission. — Washington, DC : NRC, [2026]. — URL: https://www.nrc.gov/reactors/operating/ops-experience/tritium/plant-specific-reports/ano1-2 (дата обращения: 11.03.2026)
9. DIRATA : Database on Discharges of Radionuclides to the Atmosphere and the Aquatic Environment : official website / International Atomic Energy Agency. – Vienna : IAEA, 2026. – URL: https://dirata.iaea.org/home (дата обращения: 11.03.2026).
10. Оценка поступления трития в атмосферу из брызгальных бассейнов Балаковской АЭС в холодный период / А. А. Екидин, К. Л. Антонов, А. В. Васильев [и др.] // Ядерная и радиационная безопасность. – 2017. – № 3(85). – С. 35–46. – EDN ZMZSSL.
11. *Десятов, Д. Д.* Содержание трития в твердых радиоактивных отходах АЭС / Д. Д. Десятов, А. А. Екидин, Д. А. Власов // Атомная энергия. – 2025. – Т. 139, № 4. – С. 235–241. – EDN DGFDIA.
12. *Weiner, S. K.* Constructing the Tritium “Requirement” for Nuclear Weapons / S. K. Weiner // Journal for Peace and Nuclear Disarmament. – 2026. – 1 March. – P. 1–15. – DOI: 10.1080/25751654.2026.2639054.

13. Распространение трития и его соединений в окружающей среде при нормальных условиях эксплуатации Калининской АЭС / В. Г. Барчуков, О. А. Кочетков, В. Н. Клочков [и др.] // Медицина труда и промышленная экология. – 2021. – Т. 61, № 9. – С. 594–600. – DOI 10.31089/1026-9428-2021-61-9-594-600. – EDN BLYREI.
14. Sources and Effects of Ionizing Radiation : United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2008 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Vol. II, Scientific Annexes D and E. – New York : United Nations, 2011. – 434 p. – ISBN 978-92-1-142274-0.
15. *Власов, Д. А.* Прогноз поступления трития в окружающую среду при нормальной эксплуатации АЭС / Д. А. Власов, Д. Д. Десятов, А. А. Екидин // Атомная энергия. – 2025. – Т. 138, № 3. – С. 131–137. – EDN GRWCRB.
16. *Екидин, А. А.* Идентификация основных дозообразующих радионуклидов в выбросах АЭС / А. А. Екидин, М. В. Жуковский, М. Е. Васянович // Атомная энергия. – 2016. – Т. 120, № 2. – С. 106–108. – EDN VPEBOJ.
17. Поступление трития в атмосферу с выбросами АЭС с ВВЭР и оценка дозы облучения населения / А. И. Крышев, М. Е. Васянович, А. А. Екидин [и др.] // Атомная энергия. – 2020. – Т. 128, № 6. – С. 333–336. – EDN LVGTYZ.
18. *Куделя, С. А.* Производство и перенос космогенного трития в земной атмосфере в модели PARMA / С. А. Куделя, В. С. Малышевский, Г. В. Фомин // Глобальная ядерная безопасность. – 2024. – Т.14, № 1 (50). – С. 17–21.
19. Тритий от молекулы до биосферы. 1. Закономерности поведения в окружающей среде / Е. В. Антонова, К. Л. Антонов, М. Е. Васянович, С. В. Панченко // Экология. – 2022. – №. 4. – С. 255–288. – DOI: 10.31857/S03670597220400.
20. Investigation of the environmental fate of tritium in the atmosphere : Part of the Tritium Studies Project. – Ottawa : Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC), 2009. – 104 p. – (INFO-0792).
21. Inventory and distribution of tritium in the oceans in 2016 / P.-E. Oms, P. Bailly du Bois, F. Dumas [et al.] // Science of The Total Environment. – 2019. – Vol. 648. – P. 684–695. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.136.
22. Sources, effects and risks of ionizing radiation : United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation : UNSCEAR 2016 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes : scientific report. – New York : United Nations, 2017. – 488 p. – URL: www.unscear.org (date of access: 24.05.2024).
23. *Kim, S. B.* Current understanding of organically bound tritium (OBT) in the environment / S. B. Kim, N. Baglan, P. A. Davis // Journal of Environmental Radioactivity. – 2013. – Vol. 126. – P. 83–91.
24. Радиоуглеродный и тритиевый мониторинг системы гидросфера–биосфера в районе размещения Белорусской АЭС / И. Л. Колосов, А. А. Родионов, Г. И. Лучина [и др.] // Литосфера. – 2018. – № 1(48). – С. 121–130. – EDN YACPED.
25. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 4. Inhalation dose coefficients : ICRP Publication 71 : adopted by the Commission in September 1995. – Oxford : Pergamon Press, 1995. – 405 p. – (Annals of the ICRP ; vol. 25, no. 3/4). – ISBN 0-08-042735-3.
26. UNSCEAR 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation : United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. – New York : United Nations, 2000. – Vol. 1 : Sources. – 654 p.
27. UNSCEAR 2008. Sources and effects of ionizing radiation : United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. – New York : United Nations, 2010. – Vol. 1. – 464 p.

Сведения об авторе:

Десятов Денис Дмитриевич, м. н. с. радиац. лаб. Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия. Эл. почта: desyatovdenis1995@gmail.com.

TRITIUM INTAKE CAUSED BY NPP AIRBORNE AND LIQUID RELEASES DURING NORMAL OPERATION

D. D. Desyatov

Institute of Industrial Ecology of UB RAS, Ekaterinburg, Russian Federation

This series of publications focuses on improving methods for assessing the impact of tritium (T) on the human body during the normal operation of nuclear power plants (NPPs). This article evaluates tritium intake from NPP airborne and liquid releases during normal operation based on the UNSCEAR methodology. Three sources of tritium intake are considered: atmospheric effluents, discharges into freshwater bodies, and discharges into seas and oceans. The tritium content in various environmental media was calculated for a unit effluent/discharge from an NPP. Annual tritium intake activities for adults were determined. The contribution of various pathways to the total annual tritium intake from the three considered sources was assessed. The largest contribution to tritium intake from atmospheric effluents is due to vegetable consumption (57,8 %); from freshwater discharges – drinking water consumption (93,7 %); and from marine discharges – fish consumption (41 % and 67,6 % for local and regional water bodies, respectively).

Key words: tritium; tritium activity; normal NPP operation; NPP releases; NPP discharges; tritium intake; UNSCEAR.

References

1. Future large-scale “clean” energy technology / N. V. Gorin, V. P. Kuchinov, V. V. Shidlovsky, A. V. Moiseev // Research trajectory – human, nature, technologies. – 2023. – № 4 (8). – P. 2–11. – DOI 10.56564/27825264_2023_4_2. – EDN BLSTYT.
2. Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050. – URL: https://www.iaea.org/publications/15942/energy-electricity-and-nuclear-power-estimates-for-the-period-up-to-2050 (accessed: 11.03.2026).
3. *Molchanov, S. M*. Model solution preparation by reverse osmosis method / S. M. Molchanov, D. D. Desyatov // Research trajectory – human, nature, technologies. – 2025. – № 1(13). – P. 28–50. – DOI 10.56564/27825264_2025_1_28. – EDN BDRYOY.
4. *Desyatov, D. D*. Release of radioactive cesium to the environment during standard NPP operations / D. D. Desyatov, A. A. Ekidin, S. G. Goliboroda // Atomic Energy. – 2023. – V. 134, № 1–2. – P. 112–120. – EDN SRCIRE.
5. INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Environmental Impact of Stressors. – Vienna : International Atomic Energy Agency, 2016. — 108 p. — (IAEA Nuclear Energy Series ; no. NG-T-3.15). — URL: www.iaea.org (accessed: 05.03.2026).
6. Database (RADD). Nuclide Discharge Overview : official website / European Commission. – Brussels : European Union, 2026. – URL: https://europa.eu/radd/nuclideDischargeOverview.dox?pageID=NuclideDischargeOverview (дата обращения: 11.03.2026).
7. Ecological reports JSC Rosenergoatom // Rosenergoatom : [official website]. – URL: https://www.rosenergoatom.ru/safety_environment/vozdeystvie-na-okruzhayushchuyu-sredu/ekologicheskie-otchety-ao-kontsern-rosenergoatom/ (accessed: 11.03.2026).
8. Tritium Release Reports : official website / U.S. Nuclear Regulatory Commission. – Washington, DC : NRC, [2026]. — URL: https://www.nrc.gov/reactors/operating/ops-experience/tritium/plant-specific-reports/ano1-2 (accessed: 11.03.2026).
9. DIRATA : Database on Discharges of Radionuclides to the Atmosphere and the Aquatic Environment : official website / International Atomic Energy Agency. – Vienna : IAEA, 2026. – URL: https://dirata.iaea.org/home (accessed: 11.03.2026).
10. Assessment of tritium escape into the atmosphere from the spray ponds of the Balakovo NPP in cold seasons / A. A. Ekidin, K. L. Antonov, A. V. Vasilyev [et al.] // Nuclear and Radiation Safety Journal. – 2017. – № 3(85). – P. 35–46. – EDN ZMZSSL.
11. *Desyatov, D. D.* Tritium content in solid radioactive waste from nuclear power plants / D. D. Desyatov, A. A. Ekidin, D. A. Vlasov // Atomic Energy. – 2025. – V. 139, № 4. – P. 235–241. – EDN DGFDIA.

12. *Weiner, S. K.* Constructing the Tritium “Requirement” for Nuclear Weapons / S. K. Weiner // Journal for Peace and Nuclear Disarmament. – 2026. – 1 March. – P. 1–15. – DOI: 10.1080/25751654.2026.2639054.
13. Tritium entry into the atmosphere with emissions from NPP-VVER and population irradiation dose assessment / A. I. Kryshev, M. E. Vasyanovich, A. A. Ekidin [et al.] // Atomic Energy. – 2020. – V. 128, № 6. – P. 362–367. – EDN LVGTYZ.
14. Distribution of tritium and its compounds in the environment under normal conditions of operating of Kalininskaya nuclear power plant / V. G. Barchukov, O. A. Kochetkov, V. N. Klochkov [et al.] // Russian journal of occupational health and industrial ecology. – 2021. – Т. 61, № 9. – С. 594–600. – DOI 10.31089/1026-9428-2021-61-9-594-600. – EDN BLYREI.
15. Sources and Effects of Ionizing Radiation : United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2008 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Vol. II, Scientific Annexes D and E. – New York : United Nations, 2011. – 434 p. – ISBN 978-92-1-142274-0.
16. *Vlasov, D. A.* Forecast of tritium release into the environment during the normal operation of nuclear power plants / D. A. Vlasov, D. D. Desyatov, A. A. Ekidin // Atomic Energy. – 2025. – V. 138, № 3. – P. 162–170. – EDN GRWCRB.
17. *Ekidin, A. A.* Identification of the main dose-forming radionuclides in NPP emissions / A. A. Ekidin, M. V. Zhukovskii, M. E. Vasyanovich // Atomic Energy. – 2016. – V. 120, № 2. – P. 134–137. – EDN VPEBOJ.
18. *Kudelya, S. A.* Production and transfer of cosmogenus tritium in the Earth atmosphere in the «PARMA» model / S. A. Kudelya, V. S. Malyshevsky, G. V. Fomin // Global nuclear safety. – 2024. – V.14, № 1 (50). – P. 17–21.
19. Tritium from the molecule to the biosphere. 1. Patterns of its behavior in the environment / E. V. Antonova, K. L. Antonov, M. E. Vasyanovich, S. V. Panchenko // Russian journal of ecology. – 2022. – №. 4. – P. 253–284. DOI: 10.31857/S03670597220400.
20. Investigation of the environmental fate of tritium in the atmosphere : Part of the Tritium Studies Project. – Ottawa : Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC), 2009. – 104 p. – (INFO-0792).
21. Inventory and distribution of tritium in the oceans in 2016 / P.-E. Oms, P. Bailly du Bois, F. Dumas [et al.] // Science of The Total Environment. – 2019. – Vol. 648. – P. 684–695. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.136.
22. Sources, effects and risks of ionizing radiation : United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation : UNSCEAR 2016 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes : scientific report. – New York : United Nations, 2017. – 488 p. – URL: www.unscear.org (accessed: 24.05.2024).
23. *Kim, S. B.* Current understanding of organically bound tritium (OBT) in the environment / S. B. Kim, N. Baglan, P. A. Davis. // Journal of Environmental Radioactivity. – 2013. – Vol. 126. – P. 83–91.
24. Radio-carbon and tritium monitoring of the hydrosphere and biosphere system in the district of Belarusian NPP location / I. L. Kolosov, A. A. Rodionov, G. I. Luchina [et al.] // Lithosphere. – 2018. – № 1(48). – P. 121–130. – EDN YACPED.
25. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 4. Inhalation dose coefficients : ICRP Publication 71 : adopted by the Commission in September 1995. – Oxford : Pergamon Press, 1995. – 405 p. – (Annals of the ICRP ; vol. 25, no. 3/4). – ISBN 0-08-042735-3.
26. UNSCEAR 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation : United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. – New York : United Nations, 2000. – Vol. 1 : Sources. – 654 p.
27. UNSCEAR 2008. Sources and effects of ionizing radiation : United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. – New York : United Nations, 2010. – Vol. 1. – 464 p.

Приложение

Формулы для расчета содержания трития в компонентах среды от выбросов и сбросов при нормальной эксплуатации АЭС

Выбросы в атмосферу

$$C_{air}(x) = D_1 \cdot Q \cdot x^{-n} \cdot e^{\frac{-\lambda \cdot x}{u_a}} \quad (П.1)$$

Таблица П.1. Расчет ОА трития в приземном слое атмосферы на расстоянии x (путь поступления: выбросы → приземный слой атмосферы)

Параметр	Символ	Значение	Единица измерения
ОА трития в воздухе на расстоянии *x*	$C_{air}(x)$	(П.1)	Бк/м^3
Фактор разбавления на расстоянии 1 км	D_1	5,3·10^{-7}	с/м^3
Интенсивность выброса	Q	1	Бк/с
Расстояние с подветренной стороны от точки выброса	x	5,50,300,750,1250	км
Эмпирический коэффициент	n	1,2	–
Постоянная распада (в модели может не учитываться)	λ	1,78·10^{-9}	с$^{-1}$
Скорость ветра в момент выброса	u_a	2·10^{-3}	км/с

Примечание. D_1 принят для нейтральной категории устойчивости атмосферы, сплошной облачности и умеренного ветра; n характеризует скорость разбавления облака по мере удаления радионуклида от источника; λ в модели может не учитываться.

$$C_{sw,HTO}(x) = \frac{CR_{s-a} \cdot C_{air,HTO}(x)}{H_a} \quad (П.2)$$

Таблица П.2. Расчет УА НТО в почвенной влаге на расстоянии *x* (путь поступления: приземный слой атмосферы → почвенная влага)

Параметр	Символ	Значение	Единица измерения
УА НТО в почвенной влаге на расстоянии *x*	$C_{sw,HTO}(x)$	(П.2)	Бк/л
Эмпирический коэффициент	CR_{s-a}	0,3	–
ОА трития в воздухе на расстоянии *x*	$C_{air,HTO}(x)$	(П.1)	Бк/м^3
Абсолютная влажность воздуха	H_a	6·10^{-3}	л/м^3

Примечание. CR_{s-a} – связующее звено между атмосферой и почвенной влагой (в условиях длительного выброса составит 30 % от УА в атмосферной влаге ввиду разбавления осадками, инерционности почвы и испарения).

$$C_{f,HTO}(x) = WC_p \left[RH \frac{C_{air,HTO}(x)}{H_a} + (1 - RH) \cdot C_{sw,HTO}(x) \right] / \gamma \quad (П.3)$$

Таблица П.3. Расчет УА НТО в выращиваемых продуктах питания на расстоянии *x* (путь поступления: почвенная влага → выращиваемые продукты питания)

Параметр	Символ	Значение	Единица измерения
УА НТО в пище *f* на расстоянии *x* (сырая масса)	$C_{f,HTO}(x)$	(П.3)	Бк/кг
Содержание воды в сырой пище	WC_p	Злаки – 0,12 Овощи – 0,92 Корм – 0,76	л/кг
Относительная влажность воздуха	RH	0,7	–
ОА радионуклида в воздухе на расстоянии *x*	$C_{air,HTO}(x)$	(П.1)	Бк/м^3
Абсолютная влажность воздуха	H_a	$6 \cdot 10^{-3}$	л/м^3
УА НТО в почвенной влаге на расстоянии *x*	$C_{sw,HTO}(x)$	(П.2)	Бк/л
Отношение давления паров НТО к давлению пара H_2O	γ	0,909	–

Примечание. *RH*, в отличие от H_a (которая служит разбавителем), определяет скорость и направление транспирации и диффузии между растением и атмосферой: при $RH \to 1$ испарение воды с поверхности листьев замедляется, и Т из воздуха легче проникает в ткани растения, при $RH \to 0$ растения закрывает устьица, чтобы сохранить влагу и взять воду из корней и почвенной влаги; γ учитывает явление изотопного фракционирования (молекула НТО тяжелее H_2O, и ее энергия связи выше, поэтому скорость испарения НТО ниже).

$$CR_{f,HTO}(x) = 0{,}5 \cdot (C_{sw,HTO}(x) + \frac{C_{pasture,HTO}(x)}{WC_p}) \qquad (П.4)$$

Таблица П.4. Расчет средневзвешенной УА НТО, потребляемой животными на расстоянии *x* (пути поступления: почвенная влага → продукты питания; выращиваемые продукты питания → продукты питания)

Параметр	Символ	Значение	Единица измерения
Средневзвешенная УА НТО в питьевой воде и в воде корма для животных	$CR_{f,HTO}(x)$	(П.4)	Бк/л
УА НТО в почвенной влаге на расстоянии *x*	$C_{sw,HTO}(x)$	(П.2)	Бк/л
Эмпирический коэффициент – связующее звено между атмосферой и почвенной влагой	$C_{pasture,HTO}$	(П.3)	Бк/кг
Содержание воды в пище (сырая масса)	WC_p	Корм – 0,76	л/кг

Примечание. Допускается, что 50 % потребления воды животными приходится на питьевую воду из источников поения и 50 % – на пастбищную траву.

$$C_{f,HTO}(x) = CR_{a,HTO}(x) \cdot CR_{f,HTO}(x) \qquad (П.5)$$

Таблица П.5. Расчет удельной активности НТО в пище *f* на расстоянии *x* (путь поступления: выращиваемые продукты питания (корм для животных) → продукты животного происхождения)

Параметр	Символ	Значение	Единица измерения
УА НТО в пище *f* на расстоянии *x*	$C_{f,HTO}(x)$	(П.5)	Бк/кг
Коэффициент концентрирования влаги	$CR_{a,HTO}$	Молоко – 0,87 Мясо – 0,66	(Бк/кг)/(Бк/л) или л/кг
Взвешенная УА НТО в питьевой воде и в воде в корме для животных	$CR_{f,HTO}(x)$	(П.4)	Бк/л

Примечание. $CR_{a,HTO}$ показывает, какая часть УА трития сохраняется в единице массы продукта.

$$C_{f,OBT}(x) = (1 - WC_p) \cdot \frac{WEQ_p \cdot R_p \cdot C_{f,HTO}(x)}{WC_p} \quad (П.6)$$

Таблица П.6. Расчет УА ОВТ в выращиваемых продуктах питания на расстоянии *x* (путь поступления: почвенная влага → выращиваемые продукты питания)

Параметр	Символ	Значение	Единица измерения
УА ОВТ в выращиваемых продуктах питания на расстоянии *x*	$C_{f,OBT}(x)$	(П.6)	Бк/кг
Относительное содержание воды в сырой пище	WC_p	Злаки – 0,12 Овощи – 0,92 Корм – 0,76	л/кг
Водный эквивалент	WEQ_p	Злаки – 0,56 Овощи – 0,51 Корм – 0,56	–
Фактор распределения	R_p	0,54	–
УА НТО в пище *f* на расстоянии *x*	$C_{f,HTO}(x)$	(П.5)	Бк/кг

Примечание. WEQ_p показывает массу воды, образующуюся при окислении одного килограмма сухого органического вещества (сухой остаток пищи в эквивалентном объеме воды, содержащий такое же количество атомов водорода); R_p показывает, какую долю Т в ОВТ от УА в воде, из которой эта органика строилась.

$$C_{f,OBT}(x) = CR_{a,OBT}(x) \cdot C_{pasture,OBT}(x) \quad (П.7)$$

Таблица П.7. Расчет удельной активности ОВТ в пище (*f*) на расстоянии *x* (путь поступления: выращиваемые продукты питания (корм для животных) → продукты животного происхождения)

Параметр	Символ	Значение	Единица измерения
УА ОВТ в пище (*f*) на расстоянии *x*	$C_{f,OBT}(x)$	(П.7)	Бк/кг
Коэффициент концентрирования ОВТ	$CR_{a,OBT}(x)$	Молоко – 0,24 Мясо – 0,40	(Бк/кг)/(Бк/кг) или безразмерная
УА ОВТ в корме для животных на расстоянии *x*	$C_{pasture,OBT}(x)$	(П.6)	Бк/кг

Примечание. $CR_{a,OBT}(x)$ показывает, какая доля УА трития сохраняется в органической фракции молока и мяса после прохождения через пищеварительную систему животного.

Сбросы в пресные водоемы

Таблица П.8. Расчет УА трития в водоемах (путь поступления: сбросы → пресные водоемы→ питьевая вода)

$$C_w = \frac{Q}{F \cdot 1000} \quad (П.8)$$

Параметр	Символ	Значение	Единица измерения
УА трития в водоемах	C_w	(П.8)	Бк/л
Интенсивность сбросов Т	Q	1	Бк/с
Расход воды в водоемах	F	Большие – 1000 Малые – 10	$м^3/с$
Переходной коэффициент	1000	1000	$л/м^3$

$$C_{fish} = C_w \cdot B_{fish} \quad (П.9)$$

Таблица П.9. Расчет УА трития в пресноводной рыбе (путь поступления: пресные водоемы → рыба)

Параметр	Символ	Значение	Единица измерения
УА трития в пресноводной рыбе	C_{fish}	(П.9)	Бк/л
УА трития в водоемах	C_w	(П.8)	Бк/л
Коэффициент накопления для пресноводной рыбы	B_{fish}	1	л/кг

$$C_{fish,HTO} = WC_f \cdot C_{fish} \quad (П.10)$$

Таблица П.10. Расчет УА НТО в пресноводной рыбе (путь поступления: пресные водоемы → рыба)

Параметр	Символ	Значение	Единица измерения
УА НТО в пресноводной рыбе	$C_{fish.HTO}$	(П.10)	Бк/кг
Относительное содержание воды в рыбе	WC_f	0,78	л/кг
УА трития в пресноводной рыбе	C_{fish}	(П.9)	Бк/л

$$C_{fish,OBT} = (1 - WC_f) \cdot WEQ_f \cdot R_f \cdot C_{fish} \quad (П.11)$$

Таблица П.11. Расчет УА ОВТ в пресноводной рыбе (путь поступления: пресные водоемы → рыба)

Параметр	Символ	Значение	Единица измерения
УА ОВТ в пресноводной рыбе	$C_{fish.OBT}$	(П.11)	Бк/кг
Относительное содержание воды в рыбе	WC_f	0,78	л/кг
Водный эквивалент для органического вещества рыбы	WEQ_f	0,65	–
Коэффициент распределения для рыбы	R_f	0,66	–
УА трития в пресноводной рыбе	C_{fish}	(П.9)	Бк/л

$$C_{sw,HTO} = \frac{I_{irr} \cdot C_w}{P + I_{irr}} \quad (П.12)$$

Таблица П.12. Расчет УА НТО в почвенной влаге при орошении почвы (путь поступления: сбор воды для орошения → почвенная влага)

Параметр	Символ	Значение	Единица измерения
УА НТО в почвенной влаге при орошении реки	$C_{sw,HTO}$	(П.12)	Бк/л
УА трития в водоемах	C_w	(П.8)	Бк/л
Среднесуточная норма орошения	I_{irr}	4	л/м^2
Среднесуточная норма осадков (усредненная за 150-дневный вегетационный период)	P	5	л/м^2

$$C_{f,HTO} = WC_p\left[RH \cdot C_{am} + (1 - RH) \cdot C_{sw,HTO}\right]/\gamma \quad (П.13)$$

Таблица П.13. Расчет УА НТО в пище (*f*) при орошении почвы (путь поступления: орошение почвы → выращиваемые продукты питания)

Параметр	Символ	Значение	Единица измерения
УА НТО в пище (*f*) при орошении почвы	$C_{f,HTO}$	(П.13)	Бк/кг
Содержание воды в пище (сырая масса)	WC_p	Злаковые – 0,12 Овощи – 0,92	л/кг
Относительная влажность воздуха	RH	0,7	–
Удельная активность НТО в воздушной влаге	C_{am}	C_{sw} (П.12)	Бк/л
Отношение давления паров НТО к давлению пара H_2O	γ	0,909	–

$$C_{f,OBT} = \frac{(1 - WC_p) \cdot WEQ_p \cdot R_p \cdot C_{f,HTO}}{WC_p} \quad (П.14)$$

Таблица П.14. Расчет УА ОВТ в пище (*f*) при орошении почвы (путь поступления: орошение почвы → выращиваемые продукты питания)

Параметр	Символ	Значение	Единица измерения
УА ОВТ в пище (*f*) при орошении почвы	$C_{f,OBT}$	(П.14)	Бк/кг
Содержание воды в пище (сырая масса)	WC_p	Злаковые – 0,12 Овощи – 0,92	л/кг
Коэффициент водного эквивалента	WEQ_p	Злаки – 0,56 Овощи – 0,51	–
Фактор распределения	R_p	0,54	–
Удельная активность НТО в пище (*f*) при орошении почвы	$C_{f,HTO}$	(П.13)	Бк/кг

Сбросы в моря и океаны

$$\lambda_{l,r} = \frac{\Delta V_{l,r}}{V_l} \qquad (П.15)$$

Таблица П.15. Расчет постоянной скорости обмена между локальным и региональным водоемами (путь поступления: сбросы → локальные водоемы → региональные водоемы)

Параметр	Символ	Значение	Единица измерения
Постоянная скорости обмена между локальным и региональным водоемами	$\lambda_{l.r}$	(П.15)	$г^{-1}$
Объемный обмен между локальным и региональным водоемами	$\Delta V_{l,r}$	$2 \cdot 10^{10}$	$м^3$
Объем локальных водоемов	V_l	10^9	$м^3$

$$\lambda_{r,g} = \frac{\Delta V_{r,g}}{V_r} \qquad (П.16)$$

Таблица П.16. Расчет постоянной скорости обмена между региональными и глобальными водоемами (путь поступления: сбросы → локальные водоемы → региональные водоемы)

Параметр	Символ	Значение	Единица измерения
Постоянная скорости обмена между локальными и региональными водоемами	$\lambda_{r.g}$	(П.16)	$г^{-1}$
Объемный обмен между региональным компартментом и мировым океаном	$\Delta V_{r,g}$	10^{15}	$м^3$
Объем региональных водоемов	V_r	10^{15}	$м^3$

$$\Lambda_l = \lambda + \lambda_{l,r} \qquad (П.17)$$

Таблица П.17. Расчет комбинированной постоянной удаления для локальных водоемов (путь поступления: сбросы → локальные водоемы → региональные водоемы)

Параметр	Символ	Значение	Единица измерения
Комбинированная постоянная удаления для локальных водоемов	Λ_l	(П.17)	$г^{-1}$
Постоянная распада	λ	$5{,}48 \cdot 10^{-2}$	$г^{-1}$
Постоянная скорости обмена между локальными и региональными водоемами	$\lambda_{l,r}$	(П.15)	$г^{-1}$

$$\Lambda_r = \lambda + \lambda_{r,g} \quad \text{(П.18)}$$

Таблица П.18. Расчет комбинированной постоянной удаления для региональных водоемов (путь поступления: сброс → локальные водоемы → региональные водоемы)

Параметр	Символ	Значение	Единица измерения
Комбинированная постоянная удаления для региональных водоемов	Λ_r	(П.18)	$г^{-1}$
Постоянная распада	λ	$5{,}48 \cdot 10^{-2}$	$г^{-1}$
Постоянная скорости обмена между локальными и региональными водоемами	$\lambda_{r,g}$	(П.16)	$г^{-1}$

$$\mathrm{A}_l(t) = \frac{Q}{\Lambda_{l,r}}(1 - e^{-\Lambda_l \cdot t}) \quad \text{(П.19)}$$

Таблица П.19. Расчет активности в локальных водоемах во времени (t) (путь поступления: сброс → локальный водоем)

Параметр	Символ	Значение	Единица измерения
Активность Т в локальном компартменте во времени (t)	$A_l(t)$	(П.19)	Бк
Объемный обмен между локальными и региональными водоемами	Q	$3{,}15 \cdot 10^{7}$	Бк/г
Комбинированная постоянная удаления для локальных водоемов	Λ_l	(П.17)	$г^{-1}$
Длительность сбросов	t	100	г

$$\mathrm{A}_r(t) = \frac{\lambda_{l,r} \cdot \mathrm{A}_l(t)}{\Lambda_{l,r}}(1 - e^{-\Lambda_l \cdot t}) \quad \text{(П.20)}$$

Таблица П. 20. Расчет активности Т в региональных водоемах во времени (*t*) (путь поступления: сбросы → локальные водоемы → региональные водоемы)

Параметр	Символ	Значение	Единица измерения
Активность Т в региональных водоемах во времени (*t*)	$A_r(t)$	(П.20)	Бк
Постоянная скорости обмена между локальными и региональными водоемами	$\lambda_{l,r}$	(П.15)	$г^{-1}$
Активность Т в локальных водоемах во времени (*t*)	$A_l(t)$	(П.19)	Бк
Комбинированная постоянная удаления для локальных водоемов	Λ_l	(П.17)	$г^{-1}$
Длительность сброса	*t*	100	г

$$C_c(t) = \frac{A_c(t)}{V_c \cdot 1000} \qquad (П.21)$$

Таблица П. 21. Расчет УА трития в водоемах (*c*) во времени (*t*) (путь поступления: сбросы → локальные водоемы → региональные водоемы)

Параметр	Символ	Значение	Единица измерения
УА в водоемах (*c*) во времени (*t*)	$C_c(t)$	(П.21)	Бк/л
Активность в водоемах (*c*) во времени (*t*)	$A_c(t)$	(П.19) (П.20)	Бк
Объем водоемов (*c*)	V_r	Локальные – 10^9 Региональные – 10^{15}	$м^3$
Коэффициент перехода	1000	1000	$л/м^3$

$$C_{f,c} = C_c \cdot B_f \qquad (П.22)$$

Таблица П. 22. Расчет УА трития в морепродуктах в водоемах *c* во времени *t* (путь поступления: сбросы → локальные водоемы → региональные водоемы → морепродукты)

Параметр	Символ	Значение	Единица измерения
УА трития в морепродуктах в водоемах *c* во времени (*t*)	$C_{f,c}$	(П.22)	Бк/кг
УА в компартменте (*c*)	C_c	(П.21)	Бк/л
Коэффициент биоаккумуляции для морепродуктов (*f*)	B_f	1	л/кг

Примечание. B_f – отношение УА трития в сырых морепродуктах к УА трития в морской воде.

.