DOI: 10.25283/2587-9707-2022-4-103-113 УДК 504.61: 627.8

ФОРМИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТРИТИЕМ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА НАД АКВАТОРИЯМИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВОДОЕМОВ

А. А. Екидин[1], К. Л. Антонов[1], М. Е. Васянович[1], А. В. Назарович[2]

[1]ФГБУН Институт промышленной экологии УрО РАН, Екатеринбург

[2]ФГАОУ ВО Уральский Федеральный Университет им. Первого Президента РФ Б. Н. Ельцина, Екатеринбург

Статья поступила в редакцию 25 октября 2022 г.

В статье рассмотрены возможные пути поступления трития с акваторий промышленных водоемов в атмосферу при нормальных условиях эксплуатации пунктов размещения особых радиоактивных отходов, образовавшихся в результате выполнения программы вооружения и государственного оборонного заказа. Проведено ранжирование и показана степень значимости каждого пути загрязнения тритием атмосферного воздуха над акваториями промышленных водоемов. Показано, что доминирующий вклад в загрязнение (не менее 99,99% суммарного выброса трития) происходит за счет испарения воды с поверхности водоемов. Суммарный вклад капельного уноса водного аэрозоля и эмиссии метана, содержащих тритий, пренебрежимо мал (не превышает 0,006 %).

Ключевые слова: *активность, тритий, испарение, каплеунос, эмиссия, метан, эффективная доза, радиоактивные отходы.*

Введение

Промышленные водоемы, включая Теченский каскад водоемов (далее — ТКВ), сформированы как резервуары накопления жидких радиоактивных отходов в результате выполнения государственной программы вооружения в 1949—1956 годы [1]. В настоящее время это уникальный техногенный феномен в виде неизолированного от окружающей среды площадного источника поступления радионуклидов в атмосферу. Опубликованные результаты аналитических и полевых исследований показывают, что радиоактивные вещества с поверхности промышленных водоемов могут поступать в окружающую среду как абиотическими, так и биотическими способами.

В работах [2]—[7] были исследованы основные пути поступления радиоактивных веществ, в том числе трития (T или ^{3}H): в форме водного аэрозоля при каплеуносе и при испарении воды. Для акватории водоема Карачай установлено среднее значение удельного уноса объема воды с поверхности водоема в теплый период года на уровне $1{,}95 \cdot 10^{-2}$ дм^3·м$^{-2}$·год$^{-1}$ [2]. Поступление радиоактивных веществ в атмосферу с уносом капель неравномерно во времени и во многом определяется накоплением различных радионуклидов в поверхностном микрослое воды [3]. Для двух основных ^{137}Cs и ^{90}Sr удельная активность водного аэрозоля принимается равной его удельной активности в воде промышленного водоема [4]. Результаты ряда исследований показывают, что большая часть водного аэрозоля имеет высокую скорость осаждения, и это затрудняет перенос радионуклидов с акватории водоемов за ее пределы [5], [6]. Вместе с тем этот процесс идет непрерывно в течение теплого времени года, обеспечивая постоянное присутствие радиоактивных веществ в воздухе над поверхностью промышленных водоемов.

Опубликованные результаты оценок показали, что с квадратного метра акватории в среднем может испаряться от 30 до 113 л воды в месяц [7]. При такой интенсивности в атмосферный воздух в год будет поступать активность трития, содержащаяся в ~ 0,5 $м^3$ воды соответствующего водоема.

Рассмотрены некоторые биотические способы распространения радионуклидов из промышленных водоемов в окружающую среду. Так, вынос радиоактивных веществ с комарами-звонцами из водоемов В-10 и В-17 оценивается в нескольких гигабеккерелей ^{90}Sr и сотен мегабеккерелей ^{137}Cs [8]. Такой специфичный путь поступления активности в окружающую среду не приводит к прямому загрязнению атмосферы и не может быть отнесен к неорганизованным источникам выбросов радиоактивных веществ. Результаты комплексных исследований состояния экосистем промышленных водоемов указывают на особенности биоценозов каждого из них в отдельности. Для многих характерно редуцированное состояние: отсутствие ихтиофауны, не характерная для региона сниженная численность и представительство видов фитопланктона и зоопланктона [9]. Вместе с тем в результате жизнедеятельности некоторых микроорганизмов в анаэробных условиях биогенно образуется метан, в состав которого может входить радиоактивный изотоп водорода — тритий. Выход метана с поверхности промышленных водоемов может приводить к росту концентрации трития в приземном воздухе. Такие оценки ранее не выполнялись, но могут быть сделаны на основе опубликованных данных о результатах исследований по интенсивности выбросов парниковых газов с поверхности естественных водоемов похожих климатических зон [10], [11].

Присвоение промышленным водоемам статуса объектов использования атомной энергии (далее — ОИАЭ) предполагает системное и непрерывное управление ими [1]. Планируемые и осуществляемые меры контроля за любыми источниками радиационного воздействия зависят от актуальных и прогнозных оценок и величины риска для населения и окружающей среды при нормальных, нештатных условиях его эксплуатации и аварийных ситуациях. При нормальной эксплуатации ОИАЭ ограничение радиационного воздействия на население и окружающую среду осуществляется путем соблюдения нормативов выбросов и сбросов радиоактивных веществ.

В контексте промышленных водоемов необходимость нормирования поступления радионуклидов в атмосферу может быть определена в результате консервативной оценки потенциального облучения человека от загрязненного воздуха над акваториями водоемов. Превышение ожидаемой годовой эффективной дозы 10 мкЗв без учета разбавления радионуклидов в воздухе будет означать обязательность обоснования норматива выброса всех радионуклидов, участвующих в формировании 99% дозы [12], [13]. Оценка создаваемой годовой дозы облучения должна включать все радионуклиды, содержащиеся в воде промышленных водоемов и указанные в перечне загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды [14].

В представленной работе дана консервативная оценка возможного загрязнения тритием атмосферного воздуха над акваториями промышленных водоемов в результате капельного уноса (формирования водного аэрозоля), испарения воды и выделения метана. Результаты выполненных исследований могут рассматриваться как предварительный выбор вариантов для расчетного метода инвентаризации площадных источников загрязнения атмосферы тритием.

Материалы и методы

В настоящей работе применен универсальный подход к оценке воздействия на окружающую среду при поступлении трития в атмосферу с акваторий промышленных водоемов, который включает:

- характеристику промышленных водоемов как площадных неорганизованных источников поступления трития в атмосферу: площадь акватории, содержание трития в воде;
- алгоритм расчета и ранжирование по степени значимости наиболее вероятных способов поступления трития в атмосферный воздух с единичной площади акваторий водоемов: испарение, эмиссия метана, образование водного аэрозоля;
- алгоритм расчета годовой эффективной дозы облучения человека без учета рассеивания и ранжирование по потенциальному вкладу в формирование дозы рассмотренных способов

загрязнения тритием воздуха над единичной площадью акватории промышленных водоемов.

Характеристика площадных неорганизованных источников поступления трития в атмосферу с акваторий промышленных водоемов

Поступление трития в атмосферный воздух с водным аэрозолем и при испарении определяется как интенсивностью процессов капельного уноса и парообразования, так и удельной активностью воды в конкретном водоеме. Опубликованные данные о площади акваторий промышленных водоемов В-2, В-3, В-4, В-10, В-11 и В-17 в целом дают примерно одинаковые значения [9], [15]—[17]. Данные о содержании трития в этих водоемах существенно отличаются у разных авторов и зависят от периода проведения исследований [9], [16], [17]. Для скрининговой оценки радиационного воздействия были приняты ранее опубликованные значения площади и содержания трития в воде каждого рассматриваемого водоема (табл. 1).

Таблица 1. Площадь акватории и удельная активность трития в воде промышленных водоемов

Водоем	Площадь водного зеркала, км^2	Удельная активность трития в воде, Бк/г	Содержание трития в воде, ТЕ
В-2	18,6	15,9	$1{,}35 \cdot 10^5$
В-3	0,79	56,0	$4{,}75 \cdot 10^5$
В-4	1,47	8,5	$7{,}20 \cdot 10^4$
В-10	18,6	3,7	$3{,}14 \cdot 10^4$
В-11	44,2	0,78	$6{,}61 \cdot 10^3$
В-17	0,13	3900	$3{,}31 \cdot 10^7$

Для описания содержания трития в воде часто применяют тритиевые единицы (ТЕ): 1 ТЕ соответствует изотопному отношению $^3H/^1H = 10^{-18}$. Взаимосвязь между ТЕ и единицами концентрации или радиоактивности следующая: одна ТЕ равна 0,118 Бк/л ($1{,}18 \cdot 10^{-4}$ Бк/г), или $3{,}3 \cdot 10^{-16}$ г/л [18], [19].

Оценка поступления трития в атмосферный воздух при испарении с поверхности водоемов

В опубликованной ранее работе [7] оценки испаряемости воды с акватории промышленных водоемов получены двумя способами для каждого месяца в интервале апрель—октябрь:

- на основе эмпирической формулы, связывающей среднюю испаряемость за месяц (мм) со средней температурой (°С) и относительной влажностью воздуха (%) за этот период [20];
- на основе оценки суммарного количества тепла, поглощенного водой, получены максимально возможные значения испаряемости за каждый месяц [21].

Принятые в настоящей работе результаты опубликованных оценок испаряемости представлены в табл. 2 [7]. Очевидно, что 1 мм испаряемости соответствует потере 1 л воды с поверхности площадью 1 м^2.

Таблица 2. Средние и максимальные значения испаряемости воды промышленных водоемов в теплый период года

Значение	Испаряемость за месяц, мм/мес						
	апр.	май	июнь	июль	авг.	сент.	окт.
Среднее	43,9	98,0	113,6	98,9	77,9	55,1	31,5
Максимальное	74,8	142,3	185,6	189,0	168,4	133,3	78,0

В общем виде поступление трития в атмосферу (${}^{elem}Q_i^m$) с элемента площади S^{elem} поверхности i-го водоема за месяц m оценивается как:

$$ {}^{elem}Q_i^m = S^{elem} \cdot E_i^m \cdot 10^{-3} \cdot A_i \cdot \rho, \text{ Бк/мес.,} \quad (1)$$

где E_i^m — испаряемость воды в водоеме (i) за месяц (m), мм/мес.;
S^{elem} — элементарная площадь (принимается равной 10^6 мм^2);
10^{-3} — коэффициент пропорциональности, мл/мм^3;
A_i — удельная активность трития в воде водоеме (i), Бк/г;
ρ — плотность воды (принимается постоянной и равной 1 г/мл).

Величина годового поступления трития (${}^{elem}Q_i^y$) в атмосферный воздух с единицы площади i-го водоема рассчитывается суммированием значений выброса трития при испарении за каждый месяц:

$$ {}^{elem}Q_i^y = \sum_m {}^{elem}Q_i^m, \text{ Бк/год.} \quad (2)$$

Данные табл. 2 позволяют получить оценки годового поступления трития в атмосферный воздух при испарении воды от средних значений (${}^{elem}_{mean}Q_i^y$) до максимально возможных (${}^{elem}_{max}Q_i^y$).

Оценка поступления трития в атмосферный воздух с водным аэрозолем при каплеуносе с поверхности водоемов

В настоящей работе не оценивается интенсивность образования водного аэрозоля над акваториями промышленных водоемов. Выброс трития по этому пути определяется с использованием опубликованных данных о каплеуносе с поверхности озера Карачай, который в среднем составляет 0,02 дм^3·м$^{-2}$·год$^{-1}$ [2]—[4]. Поскольку расчеты загрязнения атмосферного воздуха тритием при каплеуносе носят скрининговый характер, то оправданы следующие консервативные условия:

- распределение трития в воде любого водоема равномерно по всему объему воды, включая поверхностный слой, формирующий водный аэрозоль;
- интенсивность образования водного аэрозоля над акваторией любого промышленного водоема в один и тот же интервал времени года одинакова и соответствует оценкам, полученным для озера Карачай.

Таким образом, годовое поступление трития в атмосферу за счет каплеуноса (${}^{elem}p_i^y$) с единичной площади i-го водоема рассчитывается как:

$$ {}^{elem}p_i^y = S^{elem} \cdot 0{,}02 \cdot A_i \cdot \rho \cdot 10^3, \text{ Бк/год}, \qquad (3)$$

где S^{elem} — элементарная площадь (1 м^2);
0,02 — интенсивность капельного уноса с поверхности любого водоема, дм^3·м$^{-2}$·год$^{-1}$;
A_i — удельная активность трития в воде водоеме (i), Бк/г;
ρ — плотность воды (1 г/мл);
10^3 — коэффициент пропорциональности, мл/дм^3.

Оценка поступления трития в атмосферный воздух при выходе метана с поверхности водоемов

Озера, являясь одним из основных природных источников поступления метана в атмосферный воздух, формируют (24—27) % глобальной эмиссии метана из природных источников [10]. Образование метана в водоемах происходит круглый год, а выход его в атмосферу возможен только в теплое время года. В Западной Сибири озера площадью менее 100 га формируют эмиссию метана в атмосферу на уровне 8,6 мгCH_4м$^{-2}$год$^{-1}$ [11]. Зимой из-за устойчивого ледяного покрова метан накапливается в воде водоема и частично вмерзает в лед. Весной за короткий период таяния льда и перемешивания озерной воды происходит его интенсивное выделение в атмосферу. В данной работе за период эмиссии метана принимается характерный для рассматриваемой природной зоны вегетационный сезон со среднесуточной приповерхностной температурой воздуха не ниже 5 °С. Поступление метана в атмосферу происходит за счет следующих механизмов: пузырьковой эмиссии из мелководных частей водоемов и диффузионного с поверхности водоемов.

В обзоре [10] отмечено, что наибольшая эмиссия метана с единицы площади водной поверхности (7,2 гCH_4м$^{-2}$год$^{-1}$) характерна для озер широколиственных лесов, в то время как на северо- и среднетаежных озерах наблюдаются наименьшие значения этой величины (1,7—2,2 гCH_4м$^{-2}$год$^{-1}$). Ее величина различается для озер с различной площадью зеркала воды [10]:

- для водоемов площадью до 0,1 км^2 — 8,9 ± 2,9 гCH_4м$^{-2}$год$^{-1}$;
- для водоемов площадью от 0,1 до 10 км^2, что соответствует площади В-3, В-4, В-17, — 3,6 ± 0,3 гCH_4м$^{-2}$год$^{-1}$;
- для водоемов площадью от 10 км^2 и более, что соответствует площади В-2, В-10, В-11, — 1,5 ± 0,1 гCH_4м$^{-2}$год$^{-1}$.

Для оценки поступления трития в атмосферу при эмиссии метана с акватории водоема (i) консервативно принимается, что:

- молекула метана может содержать не более одного атома трития (CH_3T);
- отношение изотопов протия и трития во всех объектах локального биоценоза водоема (i) равно их отношению в воде данного водоема.

В газовой смеси чистого метана (CH_4) с содержащим тритий (CH_3T) известное отношение трития к протию позволяет определить частное чисел молекул CH_3T и CH_4, как четырехкратное отношение чисел атомов трития и протия в рассматриваемой газовой смеси. Отношение массы CH_3T к массе чистого метана (CH_4) при заданном ${}^3H/{}^1H$ будет равно делению числа молекул этих газов, умноженному на частное их молярных масс (18/16). Если сумму масс молекул обоих газов приравнять к 1 грамму, то, учитывая отношение масс CH_3T/CH_4 при заданном ${}^3H/{}^1H$, можно получить массы CH_3T и трития в грамме такой смеси. Активность полученной массы трития в 1 грамме метана водоема (i) рассчитывается по формуле:

$$A_i = \frac{N_A \cdot \ln 2 \cdot m_i}{T_{1/2} \cdot \mu}, \text{ Бк}, \qquad (4)$$

где μ — молярная масса, (для ${}^3H$ = 3 г/моль);
$T_{1/2}$ — 3,89·10^8 с (12,32 лет);
m_i — масса трития в 1 грамме метана водоема (i), г;
N_A — число Авогадро, (6,022·10^{23}).

Общий вид зависимости выброса трития в форме метана (${}^{elem}M_i^y$) с поверхности водоема (i) за год с элементарной площади 1 м^2:

$$ {}^{elem}M_i^y = S^{elem} \cdot J_i \cdot L_i, \text{ Бк/год}, \qquad (5)$$

где S^{elem} — элементарная площадь (1 м^2);
$J_i = A_i$/(1 г) — удельная активность трития в метане водоема (i), Бк/г;
L_i — эмиссия метана с акватории водоема (i), гCH_4м$^{-2}$год$^{-1}$.

Оценка годовой эффективной дозы от выброса трития с акваторий промышленных водоемов

Раздельное рассмотрение интенсивности поступления трития с акваторий промышленных водоемов в атмосферу при испарении воды (${}^{elem}Q_i^y$, Бк/год), каплеуносе водного аэрозоля (${}^{elem}p_i^y$, Бк/год) и эмиссии метана (${}^{elem}M_i^y$, Бк/год) позволяет оценить годовую эффективную дозу облучения человека от каждого пути загрязнения атмосферного воздуха с любой элементарной площади 1 м² i-го водоема следующим образом:

$$\text{для испарения: } E_i^Q = \Psi_i^Q \cdot {}^{elem}Q_i^y, \text{ Зв/год,} \quad (6)$$

$$\text{для каплеуноса: } E_i^p = \Psi_i^p \cdot {}^{elem}p_i^y, \text{ Зв/год,} \quad (7)$$

$$\text{для эмиссии метана: } E_i^M = \Psi_i^M \cdot {}^{elem}M_i^y, \text{ Зв/год,} \quad (8)$$

где Ψ_i^Q — функция перехода, связывающая активность годового выброса трития при испарении воды i-го водоема с годовой эффективной дозой облучения населения, Зв/Бк;
Ψ_i^p — функция перехода, связывающая активность годового выброса трития при каплеуносе водного аэрозоля i-го водоема с годовой эффективной дозой облучения, Зв/Бк;
Ψ_i^M — функция перехода, связывающая активность годового выброса трития при эмиссии метана i-го водоема с годовой эффективной дозой облучения, Зв/Бк;
${}^{elem}Q_i^y$ — интенсивность выброса трития при испарении воды с 1 м² i-го водоема, Бк/год;
${}^{elem}p_i^y$ — интенсивность выброса трития при каплеуносе водного аэрозоля с 1 м² i-го водоема, Бк/год;
${}^{elem}M_i^y$ — интенсивность выброса трития при эмиссии метана с 1 м² i-го водоема, Бк/год.

Оценка ожидаемых доз от трития в форме НТО (тритиевой воды), содержащегося в атмосферном воздухе, предполагает равенство его удельной активности в воде тканей биологических объектов и в атмосферной влаге. Соотношение для расчета функции перехода, связывающей активность годового выброса трития из i-го водоема с годовой эффективной дозой облучения населения, для процессов испарения (Ψ_i^Q, Зв/Бк) и каплеуноса (Ψ_i^p, Зв/Бк) учитывает поступления трития ингаляционно, перорально и через кожные покровы и рассчитывается по формуле:
для испарения:

$$\Psi_i^Q(x) = \frac{1}{3{,}15 \cdot 10^7} \cdot \frac{G_i^Q(x)}{H} \cdot k_T, \text{ Зв/Бк,} \quad (9)$$

для каплеуноса:

$$\Psi_i^p(x) = \frac{1}{3{,}15 \cdot 10^7} \cdot \frac{G_i^p(x)}{H} \cdot k_T, \text{ Зв/Бк,} \quad (10)$$

где 3,15·10⁷ — количество секунд в календарном году, с;
$G_i^Q(x)$ — среднегодовой метеорологический фактор разбавления в приземном слое атмосферы для трития, выбрасываемого при испарении с акватории i-го водоема в форме пара, с/м³;
$G_i^p(x)$ — среднегодовой метеорологический фактор разбавления в приземном слое атмосферы для трития, выбрасываемого при каплеуносе с акватории i-го водоема в форме водного аэрозоля, с/м³;

H — абсолютная влажность воздуха, значение которой в случае отсутствия данных местных натурных исследований рекомендуется принимать равной $6 \cdot 10^{-3}$ л/м³ [13];

k_T — дозовый коэффициент для трития в форме НТО, значение которого рекомендуется принимать равным $2{,}6 \cdot 10^{-8}$ (Зв·л)/(Бк·год) [13].

Функция перехода, связывающая активность годового выброса трития из i-го водоема при эмиссии метана с годовой эффективной дозой облучения населения, учитывает только ингаляционное поступление трития:

$$\Psi_i^M(x) = \frac{1}{3{,}15 \cdot 10^7} \cdot G_i^M(x) \cdot V_{\text{к.г.н.}} \cdot \varepsilon_{\text{нас}}^{\text{возд}}, \text{ Зв/Бк,} \quad (11)$$

где 3,15·10⁷ — количество секунд в календарном году, с;
$G_i^M(x)$ — среднегодовой метеорологический фактор разбавления в приземном слое атмосферы для трития, выбрасываемого с акватории i-го водоема при эмиссии метана, с/м³;
$V_{\text{к.г.н.}}$ — годовой объем вдыхаемого воздуха критической группой населения, в рассматриваемом случае для детей в возрасте 1—2 года составляет 1 900 м³/год [23];
$\varepsilon_{\text{нас}}^{\text{возд}}$ — дозовый коэффициент для трития при ингаляционном поступлении для критической группы населения, в рассматриваемом случае для детей в возрасте 1—2 года составляет $2{,}7 \cdot 10^{-10}$ Зв/Бк [23].

Оценка гипотетической годовой эффективной дозы без учета рассеивания соединений трития в атмосфере выполняется путем задания значений факторов разбавления в формулах (9)—(11) равными 1 с/м³.

Результаты оценок радиационного воздействия выбросов трития с акваторий промышленных водоемов

С точки зрения обеспечения безопасности эксплуатации ОИАЭ для целей хранения особых РАО важным этапом является доказательство необходимости отнесения выбросов радиоактивных веществ к числу нормируемых или аргументированное его опровержение на основании результатов инструментальной или расчетной инвентаризации с целью определения загрязнения атмосферного воздуха радиоактивными веществами. Эти данные могут быть получены на основе предварительных оценок, характеризующих форму радиоактивного вещества, его удельную активность и интенсивность поступления в атмосферу.

Поступление трития с акваторий промышленных водоемов

Интенсивность загрязнения тритием атмосферного воздуха над акваториями промышленных водоемов пропорциональна активности тритийсодержащего вещества и скорости его поступления в атмосферу с единичной поверхности водоема. Активность трития в водном аэрозоле и в парах воды определена по опубликованным исходными данными (см. раздел «Материалы и методы»), а в метане рассчитана на основе соблюдения равенства значений тритиевых единиц в воде и метане одного и того же водоема. Результаты расчета ожидаемой удельной активности трития в метане промышленных водоемов представлены в табл. 3.

***Таблица 3.** Ожидаемая удельная активность и выброс трития с метаном над акваториями промышленных водоемов*

Водоем	Удельная активность метана, Бк/г	Выброс трития при эмиссии метана	
		Удельный, $Бк{\cdot}м^{-2}{\cdot}год^{-1}$	Со всей акватории, $Бк{\cdot}год^{-1}$
В-2	$3{,}61{\cdot}10^{1}$	54,1	$1{,}01{\cdot}10^{9}$
В-3	$1{,}27{\cdot}10^{2}$	457	$3{,}61{\cdot}10^{8}$
В-4	$1{,}93{\cdot}10^{1}$	69,3	$1{,}02{\cdot}10^{8}$
В-10	$8{,}40{\cdot}10^{0}$	12,6	$2{,}34{\cdot}10^{8}$
В-11	$1{,}77{\cdot}10^{0}$	2,65	$1{,}17{\cdot}10^{8}$
В-17	$8{,}85{\cdot}10^{3}$	31 900	$4{,}14{\cdot}10^{9}$

Полученные значения удельной активности трития в метане любого промышленного водоема в 2,27 раза выше удельной активности самой воды. По величине удельного выброса трития при эмиссии метана с единичной поверхности акваторий промышленные водоемы расположились в следующей последовательности: В-17 > В-3 > В-4 > В-2 > В-10 > В-11. По суммарному выбросу трития при эмиссии метана со всей акватории последовательность иная: В-17 > В-2 > > В-3 > В-10 > В-11 > В-4.

Совокупность доступных исходных данных, определяющих интенсивность процессов испарения, каплеуноса и эмиссии метана, а также рассмотренные эмпирические закономерности и принятые консервативные условия позволяют получить скрининговые оценки годового поступления трития в атмосферу с каждого квадратного метра акваторий промышленных водоемов (табл. 4).

***Таблица 4.** Интенсивность поступления трития с акватории каждого промышленного водоема*

Водоем	Суммарный выброс трития		Вклад в суммарный выброс отдельного пути поступления, %		
	Удельный, $Бк{\cdot}м^{-2}{\cdot}год^{-1}$	Со всей акватории, $Бк{\cdot}год^{-1}$	Испарение воды	Водный аэрозоль	Эмиссия метана
В-2	$8{,}25{\cdot}10^{6}$	$1{,}53{\cdot}10^{14}$	99,995	0,004	0,001
В-3	$2{,}91{\cdot}10^{7}$	$2{,}30{\cdot}10^{13}$	99,995	0,003	0,002
В-4	$4{,}41{\cdot}10^{6}$	$6{,}48{\cdot}10^{12}$	99,995	0,003	0,002
В-10	$1{,}92{\cdot}10^{6}$	$3{,}57{\cdot}10^{13}$	99,995	0,004	0,001
В-11	$4{,}05{\cdot}10^{5}$	$1{,}79{\cdot}10^{13}$	99,995	0,004	0,001
В-17	$2{,}02{\cdot}10^{9}$	$2{,}63{\cdot}10^{14}$	99,995	0,003	0,002

Данные табл. 4 свидетельствуют о доминировании процесса испарения воды при формировании загрязнения тритием воздуха над акваториями промышленных водоемов. Пренебрежимо малый вклад в это вносит эмиссия метана, поэтому такой путь поступления трития не рассматривается для искусственных (технологических) водных объектов, а воздействие ограничивается его выбросом при испарении [7], [24], [25].

Подтвердить, опровергнуть или скорректировать полученную оценку вклада метана в этот процесс можно только в результате долговременного мониторинга его эмиссии с акваторий рассматриваемых водоемов. Результаты экспериментов по определению соотношения удельных активностей трития в воде и в метане одного и того же водоема могут оказаться полезными для других открытых водных объектов, содержащих тритий.

Доза над акваториями промышленных водоемов без учета разбавления

Расчет гипотетической дозы облучения населения от загрязнения воздуха необходим для определения вклада различных факторов в формирование годовой эффективной дозы для критической группы. Такое сравнение удобно провести на основе полученных результатов удельного выброса метана с единичной поверхности акватории водоема. Результаты расчета годовой эффективной дозы без учета разбавления представлены в табл. 5.

Полученные данные не являются количественной характеристикой радиационного воздействия на население от поступления трития с акваторий промышленных водоемов, они лишь позволяют оценить вклад рассмотренных

Таблица 5. Годовая эффективная доза облучения человека от поступления трития с единичной площади (1 м^2) акватории промышленного водоема без учета разбавления в атмосфере

Водоем	Эффективная доза за год, мкЗв·год$^{-1}$	Вклад в эффективную дозу, %		
		Испарение воды	Водный аэрозоль	Эмиссия метана
В-2	1,14	99,996	0,004	0,0001
В-3	4,00	99,996	0,004	0,0002
В-4	0,61	99,996	0,004	0,0002
В-10	0,26	99,996	0,004	0,0001
В-11	0,06	99,996	0,004	0,0001
В-17	278,41	99,996	0,004	0,0002

биотических и абиотических выбросов трития в атмосферу в годовую эффективную дозу. Показано, что основную долю в формирование облучения вносит испарение воды с акваторий промышленных водоемов. Для эмиссии метана непропорциональный интенсивности загрязнения атмосферы вклад в дозу (примерно на порядок меньший) объясняется ограничением облучения только за счет ингаляции критической группы населения. Ожидаемый вклад порядка 10^{-4}% в годовую эффективную дозу от эмиссии метана пренебрежимо мал и позволяет отказаться от рассмотрения такого пути поступления трития в атмосферу.

Выводы и обсуждения

Акватории водоемов, содержащие тритированную воду, традиционно рассматриваются как неорганизованные площадные источники поступления трития в атмосферу единственным путем — при испарении воды. Исследования в области образования водного аэрозоля, экспериментальные данные изучения эмиссии метана с акваторий озер и водоемов позволяют предположить наличие двух ранее не рассматриваемых путей загрязнения атмосферы тритием — каплеунос водного аэрозоля (тритий в форме НТО) и эмиссия метана (тритий в форме CH_3T).

Интенсивность поступления трития в воздух при каплеуносе может быть оценена на основе опубликованных данных об образовании водного аэрозоля над акваторией оз. Карачай, а при эмиссии метана может быть консервативно определена по результатам экспериментов в акваториях озер Сибири, находящихся примерно на географической широте ТКВ.

Выполненные таким образом оценки интенсивности поступления в атмосферу трития с акваторий промышленных водоемов за счет различных механизмов позволили распределить их в следующем порядке: испарение воды с поверхности водоема > каплеунос > эмиссия метана. На испарение воды приходится 99,99% загрязнения атмосферы тритием, суммарный вклад капельного уноса водного аэрозоля и эмиссии метана не превышает 0,006%.

Для подтверждения полученных консервативных оценок интенсивности выброса трития с акваторий промышленных водоемов, а также их вероятной коррекции или опровержения требуется проведение долгосрочных экспериментальных наблюдений (исследований), включающих:

- оценку интегральной активности трития в воздухе над акваторией промышленных водоемов на различных высотах;
- инструментальное определение вклада испарения и каплеуноса в загрязнение атмосферы над акваторией промышленных водоемов;
- инструментальное определение интенсивности эмиссии метана;
- определение активности трития в метане и воде каждого водоема в один и тот же период времени;
- оценку отношения тритий/протий в каждом отобранном образце метана.

Предлагаемые направления исследований позволят однозначно ответить на вопрос о необходимости (или ее отсутствии) отнесения всех или отдельных промышленных водоемов к числу нормируемых неорганизованных источников выброса трития. Такие исследования обязательны также для подтверждения гарантий безопасной эксплуатации объектов долговременного хранения особых РАО.

Литература

1. *Линге И. И., Мокров Ю. Г., Уткин С. С., Баранов С. В., Баторшин Г. Ш., Глинский М. Л., Дрожко Е. Г.* Теченский каскад водоемов ФГУП «ПО «Маяк»: текущее состояние и перспективы // Вопросы радиационной безопасности. 2011. № 1 (61). С. 5—14.
2. *Мокров К. Ю., Мокров Ю. Г.* Изучение параметров источника генерации водного аэрозоля с акватории водоёма Карачай // Вопросы радиационной безопасности. 2016. № 1 (81). С. 20—29.
3. *Мокров К. Ю., Мокров Ю. Г.* Изучение загрязнения атмосферы вблизи водоёма Карачай в результате ветрового уноса водного аэрозоля с его поверхности // Вопросы радиационной безопасности. 2017. № 1 (85). С. 67—79.
4. *Мокров К. Ю., Мокров Ю. Г.* Оценка интегрального выноса долгоживущих радионуклидов с водным аэрозолем водоема Карачай на основе анализа данных о загрязнении почвы в районе

его расположения // Вопросы радиационной безопасности. 2018. № 1 (89). С. 19—35.
5. *Mishchuk N. A., Goncharuk V. V.* Generation and Dynamics of Aerosols over Water Surface // Journal of Water Chemistry and Technology. 2011. Vol. 33. No. 2. Pp. 73—85.
6. *Gabysheva D. N., Medvedeva D. N., Misiiuk K.* Dynamics of Droplets Ejected over the Evaporating Water Surface // Technical Physics. 2021. Vol. 91. No. 9. Pp. 1331—1338.
7. *Екидин А. А., Антонов К. Л., Жуковский М. В.* Оценка загрязнения атмосферы тритием при испарении воды с поверхности промышленных водоёмов // Вопросы радиационной безопасности. 2012. № 3 (67). С. 3—10.
8. *Осипов Д. И., Дерябина Л. В., Попова И. Я., Перетыкин А. А., Егорейченков Е. А., Пряхин Е. А., Иванов И. А., Мокров Ю. Г.* Вынос радионуклидов из радиоактивно загрязнённых водоёмов с комарами-звонцами // Вопросы радиационной безопасности. 2017. № 3 (87). С. 53—56.
9. *Пряхин Е. А., Тряпицына Г. А., Дерябина Л. В., Андреев С. С., Духовная Н. И., Осипов Д. И., Обвинцева Н. А., Стяжкина Е. В., Костюченко В. А., Попова И. Я., Аклеев А. В., Стукалов П. М., Иванов И. А., Мокров Ю. Г., Медведев А. Г.* Современное состояние экосистем водоемов В-11, В-10, В-4, В-17 и В-9 «ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. 2011. № S. С. 5—23.
10. *Голубятников Л. Л., Маммарелла И.* Потоки метана в атмосферу из озер Фенноскандии // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 6. С. 672—683. DOI: 10.1134/S000235151806007X.
11. *Sabrekov A. F., Runkle B. R. K., Glagolev M. V., Terentieva I. E., Stepanenko V. M., Kotsyurbenko O. R., Maksyutov S. S., Pokrovsky O. S.* Variability in methane emissions from West Siberia's shallow boreal lakes on a regional scale and its environmental controls // Biogeosciences. 2017. Vol. 14. No. 15. Pp. 3715—3742. DOI: 10.5194/bg-14-3715-2017.
12. Методика разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух. Приказ Ростехнадзора от 07.11.2012 № 639.
13. РБ-106-21. 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». М. : Ростехнадзор, 2021.
14. Об утверждении перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 08.07.2015 № 1316-р.
15. Особые радиоактивные отходы / под общ. ред. И. И. Линге. — М. : ООО «САМ полиграфист», 2015. 240 с.
16. *Мокров Ю. Г., Алексахин А. И.* Деятельность ФГУП "ПО "МАЯК" по обеспечению безопасной эксплуатации Теченского каскада водоёмов // Вопросы радиационной безопасности. 2018. № 4 (92). С. 13—28.
17. *Кузьменкова Н. В., Власова И. Э., Рожкова А. К., Романчук А. Ю., Петров В. Г., Калмыков С. Н., Осипов Д. И., Пряхин Е. А., Плямина О. В., Грачев В. А., Алексахин А. И., Мокров Ю. Г.* Распределение радионуклидов между биотическими и абиотическими компонентами радиоактивно-загрязненных водоёмов В-17 и В-4 // Вопросы радиационной безопасности. 2017. № 1 (85). С. 54—66.
18. *Okada S., Momoshima N.* Overview of tritium: characteristics, sources, and problems // Health Physics. 1993. Vol. 65. No. 6. Pp. 595—609.
19. *Мажейка Й. В., Пятрошюс Р. И., Скуратович Ж. Л. и др.* Тритий в окружающей среде Игналинской АЭС за период ее эксплуатации // Региональная экология. 2018. № 1 (51). С. 20—30. DOI: 10.30694/1026-5600-2018-1-20-30.
20. *Иванов Н. Н.* Об определении величины испаряемости // Известия Всесоюзного географического общества. 1954. Т. 86. Вып. 1. № 2. С. 189—196.
21. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. — Л. : Гидрометеоиздат, 1969. 85 с.
22. РБ-135-17. Рекомендации по методам и средствам контроля за выбросами радиоактивных веществ в атмосферный воздух. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. — М. : Ростехнадзор, 2017.
23. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 № 47.
24. *Екидин А. А., Антонов К. Л., Васильев А. В., Васянович М. Е., Пышкина М. Д., Курындин А. В., Шаповалов А. С., Антушевский А. С., Семенов М. А., Мурашова Е. Л., Капустин И. А., Филатов И. Ю.* Оценка поступления трития в атмосферу из брызгальных бассейнов Балаковской АЭС в холодный период // Ядерная и радиационная безопасность. 2017. № 3 (85). С. 35—46.
25. *Екидин А. А., Антонов К. Л., Васянович М. Е., Пышкина М. Д., Меркулов А. Ф., Фоменко П. А.* Обоснование метода оценки поступления трития в атмосферу при охлаждении воды в брызгальных бассейнах Ростовской АЭС // Траектория исследований — человек, природа, технологии. 2022. № 1 (1). С. 86—101.

Информация об авторах

Екидин Алексей Акимович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН Институт промышленной экологии УрО РАН (620990, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 20), e-mail: ekidin@mail.ru.

Антонов Константин Леонидович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН Институт промышленной экологии УрО РАН (620990, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 20), e-mail: antonov@ecko.uran.ru.

Васянович Максим Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, ФГБУН Институт промышленной экологии УрО РАН (620990, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 20), e-mail: vasyanovich_maks@mail.ru.

Назарович Александра Владимировна, аспирант, ФГАОУ ВО Уральский Федеральный Университет им. Первого Президента РФ Б. Н. Ельцина (620002, Екатеринбург, ул. Мира, д. 21), e-mail: a.v.nazarovich@mail.ru.

Библиографическое описание статьи

Екидин А. А., Антонов К. Л., Васянович М. Е., Назарович А. В. Формирование загрязнения тритием атмосферного воздуха над актваториями промышленных водоемов // Радиоактивные отходы. 2022. № 4 (21). С. 103—113. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-4-103-113.

FORMATION OF ATMOSPHERIC AIR CONTAMINATION WITH TRITIUM ABOVE THE WATER AREAS OF INDUSTRIAL WATER BODIES

Ekidin A. A.[1], Antonov K. L.[1], Vasyanovich M. E.[1], Nazarovich A. V.[2]

[1]Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

[2]FGAOU HE Ural Federal University. First President of the Russian Federation B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Article received on October 25, 2022

The article considers the possible pathways for tritium release from the water area of industrial reservoirs into the atmosphere under normal operating conditions at the facilities holding special (non-removable) radioactive waste generated due to the implementation of the state nuclear weapons program and the state defense order. The paper provides a list ranking each potential pathway of atmospheric air contamination with tritium above the water area of industrial reservoirs and evaluates the degree of its significance. The study demonstrates that it is the water evaporation from the surface of the reservoirs that most significantly contributes to the contamination (at least 99.99% of the totally released tritium), while the total contribution of water aerosol droplet entrainment and tritium-containing methane emission is negligible (does not exceed 0.006%).

Keywords: *activity, tritium, evaporation, droplet entrainment, emission, methane, effective dose, radioactive waste.*

References

1. Linge I. I., Mokrov Yu. G., Utkin S. S., Baranov S. V., Batorshin G. Sh., Glinskiy M. L., Drozhko Ye. G. Techenskiy kaskad vodoyomov FGUP "PO"Mayak": tekushcheye sostoyaniye i perspektivy [Techa cascade of reservoirs at FSUE PA Mayak site: current state and prospects]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation Safety Issues,* 2011, no. 1 (61), pp. 5—14.

2. Mokrov K. Yu., Mokrov Yu. G. Izucheniye parametrov istochnika generatsii vodnogo aerozolya s akvatorii vodoyoma Karachay [Research on the parameters of a source generating water aerosol from

the water area of the Karachay reservoir]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation Safety Issues,* 2016, no. 1 (81), pp. 20—29.
3. Mokrov K. Yu., Mokrov Yu. G. Izucheniye zagryazneniya atmosfery vblizi vodoyoma Karachay v rezul'tate vetrovogo unosa vodnogo aerozolya s yego poverkhnosti [Study of Atmospheric Contamination in the Vicinity of Lake Karachay as a Result of Wind Transfer of Water Aerosol from its Surface]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation Safety Issues,* 2017, no. 1 (85), pp. 67—79.
4. Mokrov K. Yu., Mokrov Yu. G. Otsenka integral'nogo vynosa dolgozhivushchikh radionuklidov s vodnym aerozolem vodoyoma Karachay na osnove analiza dannykh o zagryaznenii pochvy v rayone yego raspolozheniya [Assessment of Integral Carryover of Long-Lived Radionuclides with Water Aerosols from Karachay Lake Based on the Analysis of Data on Soil Contamination in the Area of Its Location]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation Safety Issues,* 2018, no. 1 (89), pp. 19—35.
5. Mishchuk N. A., Goncharuk V. V. Generation and Dynamics of Aerosols over Water Surface. *Journal of Water Chemistry and Technology,* 2011, vol. 33, no. 2, pp. 73—85.
6. Gabysheva D. N., Medvedeva D. N., Misiiuk K. Dynamics of Droplets Ejected over the Evaporating Water Surface. *Technical Physics,* 2021, vol. 91, no. 9, pp. 1331—1338.
7. Ekidin A. A., Antonov K. L., Zhukovskiy M. V. Otsenka zagryazneniya atmosfery tritiyem pri isparenii vody s poverkhnosti promyshlennykh vodoyomov [Assessment of Tritium Air Pollution Due to Water Evaporation from the Surface of Industrial Reservoirs]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation Safety Issues,* 2012, no. 3 (67), pp. 3—10.
8. Osipov D. I., Deryabina L. V., Popova I. Ya., Peretykin A. A., Yegoreychenkov Ye. A., Pryakhin Ye. A., Ivanov I. A., Mokrov Yu. G. Vynos radionuklidov iz radioaktivno zagryaznonnykh vodoyomov s komarami-zvontsami [Transfer of Radionuclides From Radioactive Contaminated Water Bodies with Chironomid Midges]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation Safety Issues,* 2017, no. 3 (87), pp. 53—56.
9. Pryakhin Ye. A., Tryapitsyna G. A., Deryabina L. V., Andreyev S. S., Dukhovnaya N. I., Osipov D. I., Obvintseva N. A., Styazhkina Ye. V., Kostyuchenko V. A., Popova I. Ya., Akleyev A. V., Stukalov P. M., Ivanov I. A., Mokrov Yu. G., Medvedev A. G. Sovremennoye sostoyaniye ekosistem vodoyemov V-11, V-10, V-4, V-17 i V-9 PO "Mayak" [Current Ecosystem State of Reservoirs R-11, R-10, R-4, R-17 and R-9 of Mayak Pa]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation Safety Issues,* 2011, no. S, pp. 5—23.
10. Golubyatnikov L. L., Mammarella I. Potoki metana v atmosferu iz ozer Fennoskandii [Methane fluxes into atmosphere from Fennoscandian Lakes]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana — Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics,* 2018, vol. 54, no. 6, pp. 672—683.
11. Sabrekov A. F., Runkle B. R. K., Glagolev M. V., Terentieva I. E., Stepanenko V. M., Kotsyurbenko O. R., Maksyutov S. S., Pokrovsky O. S. Variability in methane emissions from West Siberia's shallow boreal lakes on a regional scale and its environmental controls. *Biogeosciences,* 2017, vol. 14, no. 15, pp. 3715—3742. DOI: 10.5194/bg-14-3715-2017.
12. *Metodika razrabotki i ustanovleniya normativov predel'no dopustimykh vybrosov radioaktivnykh veshchestv v atmosfernyy vozdukh: prikaz Rostekhnadzora ot 07.11.2012 No. 639* [Methodology for the development and establishment of standards for threshold emissions of radioactive substances into the atmospheric air: Order of Rostekhnadzor of November 7, 2012 No. 639].
13. RB-106-21. *Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoy energii "Rekomenduyemyye metody rascheta parametrov, neobkhodimykh dlya razrabotki i ustanovleniya normativov predel'no dopustimykh vybrosov radioaktivnykh veshchestv v atmosfernyy vozdukh"* [Safety Guidelines for Atomic Energy Use. Recommended Calculating Methods for the Parameters Required in the Development and Establishment of Standards for Threshold Emissions of Radioactive Substances into the Atmospheric Air]. Moscow, Rostekhnadzor Publ., 2021.
14. *Ob utverzhdenii perechnya zagryaznyayushchikh veshchestv, v otnoshenii kotorykh primenyayutsya mery gosudarstvennogo regulirovaniya v oblasti okhrany okruzhayushchey sredy: rasporyazheniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 08.07.2015 No. 1316-r* [On the approved list of pollutants subject to state regulation in the field of environmental protection: Decree of the Government of the Russian Federation of July 8, 2015 No. 1316-r].
15. *Osobyye radioaktivnyye otkhody* [Non-removable Radioactive Waste] / under general edt. of I. I. Linge. Moscow, OOO SAM poligrafist Publ., 2015. 240 p.
16. Mokrov Yu. G., Aleksakhin A. I. Deyatel'nost' FGUP "PO "Mayak" po obespecheniyu bezopasnoy ekspluatatsii techenskogo kaskada vodoyomov [Safety Measures Undertaken by Mayak PA Management of the Techa Cascade of Reservoirs]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation Safety Issues,* 2018, no. 4 (92), pp. 13—28.
17. Kuz'menkova N. V., Vlasova I. E., Rozhkova A. K., Romanchuk A. Yu., Petrov V. G., Kalmykov S. N., Osipov D. I., Pryakhin Ye. A., Plyamina O. V., Grachev V. A., Aleksakhin A. I., Mokrov Yu. G. Raspredeleniye radionuklidov mezhdu bioticheskimi i abioticheskimi komponentami radioaktivno-zagryaznonnykh vodoyomov V-17 i V-4 [Radionuclide Distribution

among Biotic and Abiotic Components in Radioactively Contaminated Reservoirs V-17 and V-4]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation Safety Issues,* 2017, no. 1 (85), pp. 54—66.
18. Okada S., Momoshima N. Overview of tritium: characteristics, sources, and problems. *Health Physics,* 1993, vol. 65, no. 6, pp. 595—609.
19. Mazheyka J. V., Pyatroshyus R. I., Skuratovich Zh. L. et al. Tritiy v okruzhayushchey srede Ignalinskoy AES za period yeye ekspluatatsii [Tritium in the environment of the Ignalina NPP in the Period Its Operation]. *Regional'naya ekologiya — Regional ecology,* 2018, no. 1 (51), pp. 20—30. DOI: 10.30694/1026-5600-2018-1-20-30.
20. Ivanov N. N. Ob opredelenii velichiny isparyayemosti [On the volatility evaluation]. *Izvestiya Vsesoyuznogo geograficheskogo obshchestva — Proceedings of the All-Union Geographical Society,* 1954, vol. 86, iss. 1, no. 2, pp. 189—196.
21. *Ukazaniya po raschetu ispareniya s poverkhnosti vodoyomov* [Instructions for calculating evaporation from the surface of water bodies]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1969. 85 p.
22. RB-135-17. *Rekomendatsii po metodam i sredstvam kontrolya za vybrosami radioaktivnykh veshchestv v atmosfernyy vozdukh. Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoy energii* [Recommendations on methods and means providing control over the emissions of radioactive substances into the atmospheric air. Safety Guidelines for Atomic Energy Use]. Moscow, Rostekhnadzor Publ., 2017.
23. SanPiN 2.6.1.2523-09. *Normy radiatsionnoy bezopasnosti (NRB-99/2009). Utverzhdeny postanovleniyem Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha Rossiyskoy Federatsii ot 07.07.2009 № 47* [Radiation safety standards (NRB-99/2009). Approved by the Decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation of July 7, 2009 No. 47].
24. Ekidin A. A., Antonov K. L., Vasil'yev A. V., Vasyanovich M. Ye., Pyshkina M. D., Kuryndin A. V., Shapovalov A. S., Antushevskiy A. S., Semenov M. A., Murashova Ye. L., Kapustin I. A., Filatov I. Yu. Otsenka postupleniya tritiya v atmosferu iz bryzgal'nykh basseynov Balakovskoy AES v kholodnyy period [Assessment of Tritium Escape into Atmosphere from the Spray Ponds of the Balakovo NPP in Cold Seasons]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' — Nuclear and Radiation Safety,* 2017, no. 3 (85), pp. 35—46.
25. Ekidin A. A., Antonov K. L., Vasyanovich M. Ye., Pyshkina M. D., Merkulov A. F., Fomenko P. A. Obosnovaniye metoda otsenki postupleniya tritiya v atmosferu pri okhlazhdenii vody v bryzgal'nykh basseynakh Rostovskoy AES [Substantiation of the Method for Assessing the Tritium Release into the Atmosphere When Cooling Water in the Spray Ponds of the Rostov NPP]. *Trayektoriya issledovaniy — chelovek, priroda, tekhnologii — Research trajectory — man, nature, technology,* 2022, no. 1 (1), pp. 86—101.

Information about the authors

Ekidin Alexey Akimovich, PhD, Leading researcher, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, S. Kovalevskaya st., Ekaterinburg, 620990, Russia), e-mail: ekidin@mail.ru.

Antonov Konstantin Leonidovich, PhD, Senior research associate, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, S. Kovalevskaya st., Ekaterinburg, 620990, Russia), e-mail: antonov@ecko.uran.ru.

Vasyanovich Maxim Evgenievich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, researcher, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, S. Kovalevskaya st., Ekaterinburg, 620990, Russia), e-mail: vasyanovich_maks@mail.ru.

Nazarovich Alexandra Vladimirovna, postgraduate student, FGAOU HE Ural Federal University. First President of the Russian Federation B. N. Yeltsin (21, Mira st., Ekaterinburg, 620002, Russia), e-mail: a.v.nazarovich@mail.ru.

Bibliographic description

Ekidin A. A., Antonov K. L., Vasyanovich M. E., Nazarovich A. V. Formation of atmospheric air contamination with tritium above the water areas of industrial water bodies. *Radioactive Waste,* 2022, no. 4 (21), pp. 103—113. DOI: 10 25283/2587-9707-2022-4-103-113. (In Russian).