

Оценка уровня годового поступления трития в воздух с поверхности озера Кызылташ

В.В. Востротин, А.Ю. Янов

Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства России, Озёрск, Россия

В статье представлены результаты исследования уровней объемной активности трития в водоеме-хранилище жидких радиоактивных отходов Производственного объединения «Маяк» — озере Кызылташ. Недостаточная изученность путей миграции трития из водоема и их количественная оценка в современных условиях не позволяют в полной мере объективно оценивать и прогнозировать влияние объекта «ядерного наследия» на население г. Озёрска и окружающую среду. Исследование было направлено на получение научных результатов, которые будут являться отправной точкой для формирования программы мониторинга промышленных водоёмов Производственного объединения «Маяк» по тритию. Целью исследования являлась оценка динамики объемной активности трития в озере Кызылташ, оценка параметров водного баланса и уровня поступления трития в воздух с его поверхности в безледоставный период. Было отобрано 33 пробы воды. Измерения объемной активности трития в воде были проведены с использованием жидкостно-сцинтилляционного спектрометра Quantulus-1220. Среднее значение уровня объемной активности трития в 2021 г. составило $1,57E+04$ Бк/л, $SD = 1,1E+03$ Бк/л, что более чем в 2 раза превышало уровень вмешательства. Выявлен тренд снижения среднемесячной объемной активности трития в водоеме в течение периода наблюдения. При проведении расчетов установлено, что в 2021 г. с поверхности озера Кызылташ в безледоставный период в процессе испарения в воздух поступило 196 ТБк трития, что сопоставимо с выбросами трития всех предприятий РФ (179 ТБк), кроме Производственного объединения «Маяк». Полученные значения испарившегося трития составили 13% от выбросов в атмосферу трития Производственного объединения «Маяк» в 2020 г. Всего с поверхности водоема испарилось $\sim 12,2$ млн m^3 в течение периода наблюдения. Созданная модель зависимости объёмной активности трития от времени в озере Кызылташ с помощью экспоненциально убывающей функции позволила определить водный баланс озера Кызылташ в безледоставный период в 2021 г. с дефицитом $\sim 6,3$ млн m^3 . Исследование параметров модели позволяет прогнозировать санитарно-гигиенические показатели водоема с позиции радиационной безопасности и рассчитывать водный баланс водоема в отдельные промежутки времени.

Ключевые слова: тритий, озеро Кызылташ, миграция трития, водный баланс, Производственное объединение «Маяк».

Введение

Озеро Кызылташ (Водоем В-2) является открытым хранилищем естественного происхождения жидких радиоактивных отходов (ЖРО) ПО «Маяк». Код водного объекта в Государственном водном реестре 14010500711111200007640, площадь водоема, по различным источникам составляет 18,2–19,47 км², объем – 84 млн m^3 [1,2]. Озеро расположено в предгорье Южного Урала и по своим характеристикам относится к водоемам эрозионно-тектонического происхождения с водным балансом, характерным для объектов такого типа [3]. С 1954 г. озеро Кызылташ приобрело статус закрытого

водоема-хранилища низкоактивных ЖРО, сброс воды в реку Теча из данного озера был прекращен [4]. По состоянию на 2013 г. в нем содержится 0,03 млн Ки ЖРО. Исходя из концепции ПО «Маяк» по выводу водоемов из эксплуатации, в ближайшее время предприятие не планирует прекращения использования Водоема В-2, что является отложенной проблемой «ядерного наследия» [5].

Долговременное использование озера Кызылташ в качестве хранилища ЖРО привело к накоплению в нем радионуклидов, содержащихся в сбросах предприятия. Ближайшие предприятия и организации г. Озёрска находятся на расстоянии 100–600 м, а ближайшие объекты

Востротин Вадим Владимирович

Южно-Уральский институт биофизики

Адрес для переписки: 456780, Россия, Челябинская область, Озёрск, Озёрское шоссе, д. 19; E-mail: vostrotin@subi.su

жилой застройки на расстоянии порядка 1,7 км от озера Кызылташ, которое является источником потенциальной опасности для окружающей среды, жителей и работников предприятий и организаций г. Озерска.

Одним из основных радионуклидов, находящихся в выбросах и сбросах ПО «Маяк», является тритий. Количество выбросов и сбросов трития предприятием является регламентированным. При этом в результате производственной деятельности ПО «Маяк» осуществляет выбросы трития в атмосферу на 1–2 порядка величины ниже регламентных значений [6].

В открытой печати имеется небольшое количество публикаций, в которых описано радиоэкологическое и санитарное состояние озера Кызылташ. В частности, имеются лишь единичные результаты исследований объемной активности (ОА) трития в водоеме в 2007–2009 гг., 2015 г. [7, 8] и количества переноса трития в атмосферу за счет испарения [2]. При этом средние значения ОА трития в водоеме были на уровне 7600 Бк/л, что, согласно нормам радиационной безопасности (НРБ-99/2009), соответствует уровню вмешательства (УВ) по тритию в питьевой воде¹. Недостаточная изученность путей миграции трития из водоема и их количественная оценка в современных условиях не позволяют в полной мере объективно оценивать и прогнозировать влияние объекта «ядерного наследия» на население г. Озерска и окружающую среду. Исследование было направлено на получение научных результатов, которые будут являться отправной точкой для формирования программы мониторинга промышленных водоёмов ПО «Маяк» по тритию.

Цель исследования – оценка динамики ОА трития в озере Кызылташ, оценка параметров водного баланса и уровня поступления трития в воздух с его поверхности в безледоставный период.

Материалы и методы

В 2021 г. озеро Кызылташ полностью освободилось от льда 20 апреля. В период с 27.04.2021 г. по 27.09.2021 г. проводился отбор воды из озера 3–4 раза в месяц. Отбор воды производился в 2 точках (рис. 1).

Точка отбора проб №1 располагалась в районе метеостанции ПО «Маяк», в непосредственной близости от предприятия. Точка отбора проб № 2 находилась на расстоянии 2,4 км от точки № 1, в районе гаражного строительного кооператива (ГСК). Выбор точек отбора проб был обусловлен параметром максимального удаления друг от друга при беспрепятственной доступности подхода к берегу.

Всего было отобрано 33 пробы воды (14 – в точке № 1, 19 – в точке № 2), из которых 28 проб отбирались параллельно: в один день в 2 точках – по 14 проб в каждой точке.

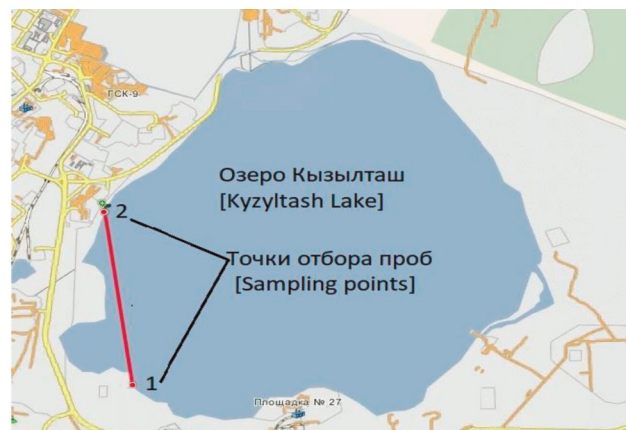


Рис. 1. Точки отбора проб воды из озера Кызылташ
[Fig. 1. Sampling points of water from the Kyzyltash lake]

С целью измерения ОА трития в пробе проводилась дистилляция аликвоты объемом 100 см³. Из полученного дистиллята изготавливался счетный образец. В виалу автоматическим распределителем Dispenser вносился ЖС Optiphase Hisafe III объемом 12 см³ и дистиллят пробы объемом 8 см³, отобранный дозатором. Виала плотно закрывалась крышкой, встряхивалась и помещалась для охлаждения и высвечивания в измерительное отделение Quantulus-1220, где выдерживалась не менее 12 ч при положении регулятора температуры +18°C.

Измерения ОА трития в воде были проведены в соответствии с МВИ (Методика измерения объемной активности трития в пробах воды и мочи с использованием жидкостно-сцинтилляционного спектрометра Quantulus-1220)².

Для определения поступления трития в атмосферу в процессе испарения использовали эмпирическую формулу Н.Н. Иванова [9]:

$$E_M = 0,0018 \times (25 + t^{\circ C})^2 \times (100 - f) \quad (1)$$

где:

E_M – испаряемость за месяц (мм/мес.);

$t^{\circ C}$ – средняя температура воздуха за месяц (°C);

f – средняя относительная влажность воздуха за месяц (%).

Среднемесечные значения температуры и влажности воздуха определялись с использованием результатов их измерений на ближайшей метеостанции (п. Аргаяш) по данным портала gr5 [10].

Результаты и обсуждение

Полученные в результате измерений данные по ОА трития подверглись проверке на нормальность рас-

¹ Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) [Sanitary rules and standards SanPin 2.6.1.2523-09. Radiation safety standards (RSS-99/2009) (In Russ.)].

² Методика выполнения измерений объемной активности трития в пробах воды и мочи с использованием жидко-сцинтилляционного спектрометра Quantulus-1220. ФГУП «Южно-Уральский институт биофизики». Озерск, 2016), свидетельство об аттестации МИ № 222.0032/RA.RU.311866/2019 [Methods for measuring the volume activity of tritium in water and urine samples using a Quantulus-1220 liquid scintillation spectrometer; Federal State Unitary Enterprise South Ural Institute of Biophysics. Ozersk, 2016.), certificate of certification No. 222.0032 / RA.RU.311866 / 2019 (In Russ.)].

пределения полученных значений в выборках. Вначале проводилась проверка данных, полученных при измерении 28 проб из разных точек отбора, собранных в один день с 10.06.2021 г. по 27.09.2021 г. Проверка гипотезы о нормальности распределения проводилась с помощью теста Шапиро – Уилка. Значение критерия Шапиро – Уилка для выборки данных точки отбора № 2 составило: $W = 0,95$ при уровне значимости $p = 0,59$, для точки отбора №1 $W = 0,97$ при уровне значимости $p = 0,91$. Результаты проверки показали, что распределения ОА трития в выборках статистически значимо не отличались от нормального ($p > 0,05$). Статистические характеристики ОА трития в точках отбора проб в период с 10.06.2021 г. по 27.09.2021 г. приведены в таблице 1.

При сравнении значений переменных двух выборок (точки отбора № 1 и № 2) с использованием парного t-теста Стюдента ($t = -1,06$, $p = 0,299$) не было выявлено статистически значимых различий по среднему значению, что позволило объединить обе выборки в одну совокупность с целью проведения дальнейших расчетов. В апреле и мае 2021 г. отбор проб воды осуществлялся только в точке отбора № 2. При предположении о том, что условия, при которых отбирались пробы в точке № 2 в апреле и мае 2021 г., соответствовали условиям в точке № 1, в период отбора проб значения, полученные в результате измерения 5 проб, полученные в апреле и мае 2021 г., были добавлены в выборку для точки № 2 и также объединены в одну совокупность. Таким образом, для количественного определения миграции трития с поверхности озера Кызылташ были использованы результаты измерений всех проб воды, отобранных при проведении экспедиций.

На основании полученных данных была построена регрессионная экспоненциально-убывающая модель зависимости средней ОА трития от времени отбора проб по месяцам (рис. 2). Методом экстраполяции было получено среднее значение ОА трития в октябре 2021 г. в озере Кызылташ, которое составило $1,39E+04$ Бк/л. Среднее значение среднемесячных ОА трития в безледоставный период в озере Кызылташ составило $1,57E+04$ Бк/л (при стандартном отклонении $1,1E+03$ Бк/л), что более чем в 2 раза превышало уровень вмешательства для питьевой воды, установленный НРБ-99/2009 (7600 Бк/л). При этом коэффициент вариации значений по месяцам не превышал 5%. Был выявлен тренд снижения среднемесячной ОА трития в озере Кызылташ от начала к концу безледоставного периода.

Ранее проведенными исследованиями также было установлено изменение ОА трития в озере Кызылташ в течение нескольких лет, однако в ходе этих иссле-

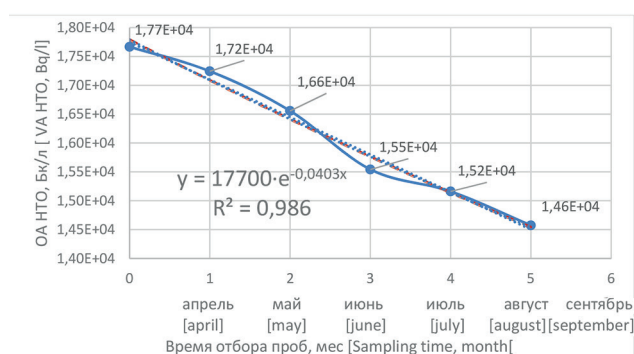


Рис. 2. Регрессионная модель и тренд снижения среднемесячной ОА трития в озере Кызылташ с апреля по сентябрь 2021 г.

[Fig. 2. Regression model and decreasing trend of monthly average tritium VA in the Kyzyltash lake from April to September 2021]

дований отбирались лишь единичные пробы в течение 1 года, что не позволяло выявить закономерности изменения ОА трития в водоеме с течением времени. Средние значения ОА трития и ошибка среднего ($n=11$) в озере Кызылташ за 2007–2009 гг. составляли 6730 ± 830 Бк/л [7]. Это статистически значимо в 2,3 меньше ($t = 7,2$, $p < 0,0001$) среднего значения ОА трития в озере Кызылташ в 2021 г. (15700 ± 884 Бк/л, $n=33$) ОА трития в единичной, отобранной нами пробе в 2015 г. составляла $\sim 11,2$ кБк/л [8].

Для определения поступления трития в атмосферу с поверхности озера Кызылташ в безледоставный период были использованы открытые данные ближайшей метеостанции, а именно среднемесячные температуры воздуха и среднемесячные показатели относительной влажности воздуха. На основании среднемесячных значений температуры, относительной влажности воздуха и формулы (1) были получены данные по испарению воды со всей поверхности озера Кызылташ по месяцам. Учитывая, что в апреле безледоставный период составил 1/3 месяца, расчет испаряемости и определение поступления трития в атмосферу проведен именно за этот период. При этом площадь озера принималась равной $\sim 19,47$ км² [2]. Объем испарившейся воды в месяц определяли по формуле:

$$V = S \times E_M \quad (2)$$

где:

V – объем испарившейся воды за месяц (тыс. м³/мес.);

S – площадь озера (км²);

E_M – испаряемость за месяц (мм/мес.).

Конечным результатом анализа являлось получение количественной оценки миграции трития с поверхности озера Кызылташ.

Таблица 1
Статистические характеристики ОА трития (Бк/л) в точках отбора проб в период с 10.06.2021 г. по 27.09.2021 г.

[Table 1]

Statistical characteristics of tritium VA (Bq/l) in the sampling points

Точка отбора проб [Sampling point]	Число наблюдений [Number of observations]	Среднее значение [Average value]	Минимум [Minimum]	Максимум [Maximum]	Стандартное отклонение [Standard deviation]
№1	14	$1,54E+04$	$1,32E+04$	$1,66E+04$	$8,33E+02$
№2	14	$1,55E+04$	$1,46E+04$	$1,65E+04$	$5,48E+02$

Полученные результаты поступления трития в атмосферу указывают на неравномерность его поступления в течение безледоставного периода по месяцам. Такая неравномерность обусловлена, в основном, относительной влажностью воздуха. Количественные показатели поступления трития в атмосферу напрямую оценивались как произведение объема испарившейся воды с поверхности водоема в определенный период времени и ОА трития в воде. Значения объемов испарения зависели от температуры и относительной влажности воздуха (табл. 2).

За 2021 г. год в безледоставный период поступление трития в атмосферу с поверхности озера Кызылташ составило около 196 ТБк при общем испарении воды с поверхности водоема в количестве ~12,2 млн м³. При сравнении с количеством выбросов трития в атмосферу предприятием ПО «Маяк» поступление трития с поверхности озера Кызылташ составило ~13% от выбросов в атмосферу в 2020 г. Поступление трития в атмосферу с озера Кызылташ в 2021 г. было на уровне значений выбросов, осуществляемых всеми предприятиями РФ, за исключением ПО «Маяк», в 2020 г. [6] (рис. 3).

Для моделирования миграции трития из озера Кызылташ, приняв за условие отсутствие сбросов радионуклида в данное озеро, изменение общей активности трития $A(t)$ и изменение объема воды $V(t)$ в безледоставный период 2021 г. можно в первом приближении представить в виде системы 2 дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dA}{dt} = -(\lambda + \gamma)A \\ \frac{dV}{dt} = \mu - \gamma V \end{cases} \quad (3)$$



Рис. 3. Источники поступления трития в атмосферу:

1 – выбросы ПО «Маяк» в 2020 г., 2 – испарение с озера Кызылташ в 2021 г., 3 – суммарные выбросы трития предприятиями РФ в воздух, за исключением ПО «Маяк», в 2020 г., Бк

[Fig. 3. Sources of tritium in the atmosphere: 1 – Mayak PA releases in 2020, 2 – evaporation of lake Kyzyltash in 2021, 3 – total tritium releases from Russian facilities except Mayak PA in 2020, Bq]

где:

t – время, начиная с 27.04.2021 г., сут;

λ – постоянная радиоактивного распада трития, равная $1,54 \cdot 10^{-4}$ сут⁻¹ (связана с периодом полураспада 4500 сут = 12,32 года);

γ – скорость убывания активности трития, обусловленного убылью загрязнённой радионуклидом воды из озера («грязной» воды) за счёт испарения, инфильтрации в грунт и других процессов, сут⁻¹;

Таблица 2

Среднемесячные значения температуры воздуха и относительной влажности воздуха, количество испарившейся воды и поступление трития в атмосферу с поверхности озера Кызылташ в 2021 г.

[Table 2]

Monthly average values of atmospheric temperature and relative air humidity, amount of evaporated water and atmospheric entry of tritium from lake Kyzyltash surface in 2021]

Месяц [Month]	Температура воздуха, °C [Air temperature, °C]	Относительная влажность воздуха, % [Relative humidity of the air,%]	Испарение, мм/мес. [Evaporation, mm/month]	Объем испарившейся воды, тыс. м ³ /мес. [The volume of evapo- rated water, thousand m ³ /month]	Поступление трития в атмосферу, Бк [Entry of tritium into the atmosphere, Bq]
Апрель [April]	6,7	47	95,9	622*	1,10E+13*
Май [May]	16,9	46	161,2	3138	5,41E+13
Июнь [June]	17,2	61	125,0	2434	4,03E+13
Июль [July]	18,1	72	93,6	1828	2,83E+13
Август [August]	18,9	67	115,0	2229	3,38E+13
Сентябрь [September]	10,2	70	66,9	1303	1,90E+13
Октябрь** [October**]	4,2	76	36,8	679	9,91E+12

* – рассчитано за период 1/3 месяца [Calculated for a period of 1/3 months].

** – расчетное значение [Calculated value].

μ – скорость поступления воды, не содержащей трития, в озеро («чистой» воды), л/сут.

Система (3) имеет следующее решение:

$$A(t) = A_0 e^{-(\lambda+\gamma)t} \quad (4)$$

$$V(t) = \frac{\mu}{\gamma} (1 - e^{-\gamma t}) + V_0 e^{-\gamma t} \quad (5)$$

где:

A_0 – начальное значение активности трития в озере,

Бк;

V_0 – начальное значение объёма воды в озере, л.

Активность трития в озере убывала по экспоненциально-убывающему закону. Оценка относительной скорости убывания воды в течение безледоставного периода только за счёт испарений составила $\gamma_{исп} = (12,2 \text{ млн м}^3) / (84 \text{ млн м}^3 \cdot 210 \text{ сут}) = 6,92 \cdot 10^{-4} \text{ сут}^{-1}$. Возможные 3 случая изменения объёма воды в озере Кызылташ при $V_0 = 8,4 \cdot 10^{10} \text{ л}$, вычисленные с помощью выражения (5), представлены на рисунке 4. В случае 1 уровень воды в озере стабилен и не изменяется с течением времени, при этом выполняется условие $\mu / \gamma_{исп} = V_0$. В случае 2 объём воды уменьшается из-за более низкой в 1,1 раза скорости пополнения воды, чем в случае 1. В случае 3 объём воды за счёт более высокой скорости пополнения, чем в случае 1 (также в 1,1 раза), наоборот, увеличивается.

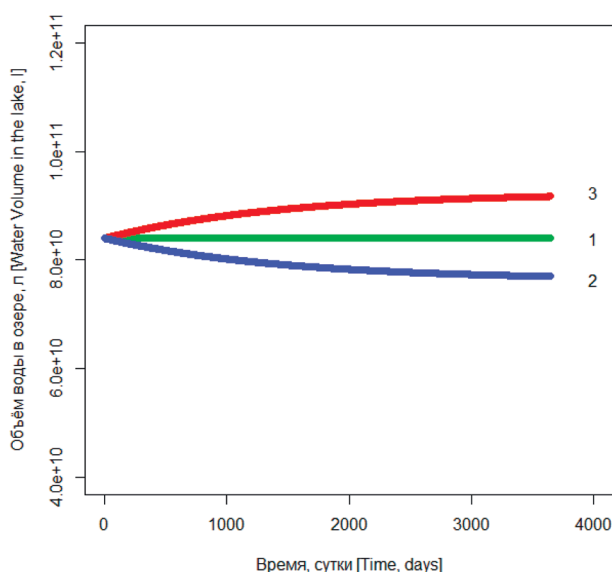


Рис. 4. Возможные случаи изменения объема воды в озере Кызылташ при расходе, обусловленном только испарениями с поверхности в безледоставный период с относительной скоростью убывания при различных значениях абсолютной скорости прихода воды: 1 – без изменения, 2 – уменьшение, 3 – увеличение

[Fig. 4. Possible cases of variation of water volume in the Kyzyltash lake regarding water discharge related to evaporation from the water surface only in the ice-free period with relative decrease rate with various values of absolute rate of water inflow 1 – no changes, 2 – decrease, 3 – increase]

Таким образом, изменение объёмной активности трития в озере со временем может быть описано с помощью выражения:

$$C(t) = \frac{A(t)}{V(t)} = \frac{A_0 e^{-(\lambda+\gamma)t}}{\frac{\mu}{\gamma}(1 - e^{-\gamma t}) + V_0 e^{-\gamma t}} \quad (6)$$

Далее рассмотрим 2 случая. В первом случае, если начальное значение объёма воды равно равновесному значению, то объёмная активность трития в озере будет равна:

$$C(t) = C_0 e^{-(\lambda+\gamma)t} \quad (7)$$

где:

C_0 – начальное значение объёмной активности трития в озере, Бк/л.

Использование метода наименьших квадратов (МНК) на основе исходных данных по измерению ОА трития приводит к оценкам $C_0 = (1,771 \pm 0,020) \cdot 10^4 \text{ Бк/л}$ и $\gamma = (1,224 \pm 0,013) \cdot 10^{-3} \text{ сут}^{-1}$. Оценка полной скорости убывания, с учётом распада трития, равная $1,378 \cdot 10^{-3} \text{ сут}^{-1}$, согласуется с оценкой, полученной выше на основе среднемесячных уровней ОА радионуклида, равной $4,03 \cdot 10^{-2} \text{ мес}^{-1} \approx 1,34 \cdot 10^{-3} \text{ сут}^{-1}$ (см. рис. 2). Результат моделирования ОА трития в воде в течение времени с помощью экспоненциально-убывающей функции представлен на рисунке 5.

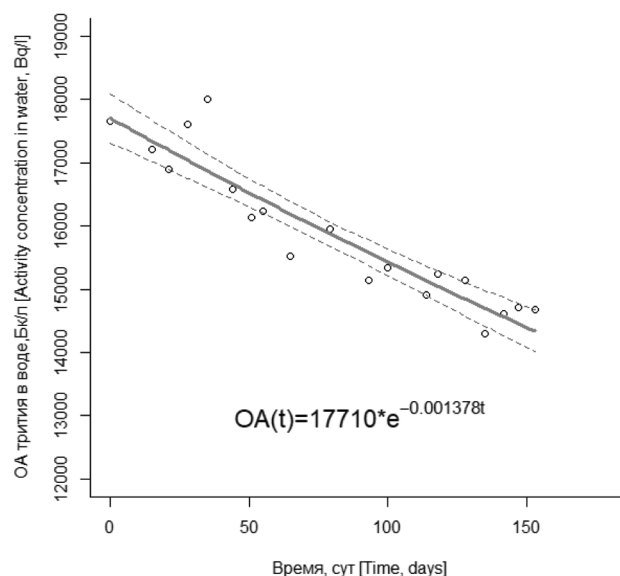


Рис. 5. Результат моделирования зависимости ОА трития в воде озера Кызылташ от времени в течение безледоставного периода 2021 г., с помощью экспоненциально убывающей функции с 95% доверительной областью

[Fig. 5. Result of modelling dependence of tritium VA in Kyzyltash lake water from time during the ice-free period in 2021 using the exponentially decreasing function with 95% confidence region]

При $V_0 = 84 \text{ млн м}^3$ начальное значение активности трития в озере составит $A_0 = 1,488 \cdot 10^{15} \text{ Бк}$, скорость поступления «чистой» воды будет равна $\mu = 1,028 \cdot 10^8 \text{ л/сут}$. Тогда в течение безледоставного периода, равного 210 суток (7 месяцев), приходная часть водного баланса водоема («чи-

стой» воды) составит 21,6 млн м³. Ровно столько же составит расходная часть водного баланса («грязная» вода).

Во втором случае, отражающем реальную ситуацию в 2021 г., в озере происходило уменьшение объёма воды. Установлено, что сезонные колебания уровня воды для озера предгорья Южного Урала составляют от 25 до 40 см [3]. Для определения показателей водного баланса введём параметр δ , выраженный в долях, показывающий, насколько уменьшился первоначальный объём воды в течение 210 суток. При этом начальное значение объёма воды в озере V_0 и объёмная активность трития $C(t)$ в зависимости от параметров A_0 , μ и γ будут равны:

$$V_0 = \frac{\mu}{\gamma} \times \frac{1 - e^{-\gamma \times 210}}{1 - \delta - e^{-\gamma \times 210}} \quad (8)$$

$$C(t) = \frac{A_0 / \mu e^{-(\lambda + \gamma)t}}{\frac{1}{\gamma} \left(1 - e^{-\gamma t} + \frac{1 - e^{-\gamma \times 210}}{1 - \delta - e^{-\gamma \times 210}} e^{-\gamma t} \right)} \quad (9)$$

На основе исходных данных об объёмной активности трития в озере с использованием МНК при $\delta=0,075$ были получены следующие оценки: $A_0/\mu = (1,492 \pm 0,142) \cdot 10^7$ Бк-сут/л, $\gamma = (1,607 \pm 0,013) \cdot 10^{-3}$ сут⁻¹. Скорость убывания «грязной» воды из озера была выше, чем в первом случае, следствием чего и стало падение уровня воды. Принимая, как и в первом случае, $V_0 = 8,4 \cdot 10^{10}$ л, получим оценку $\mu = 9,96 \cdot 10^7$ л/сут и равновесный объём озера, равный $\mu/\gamma = 6,6 \cdot 10^{10}$ л.

Тогда за 210 суток в озеро поступит $2,09 \cdot 10^{10}$ л «чистой» воды, а уйдёт на $0,075 \times 8,4 \cdot 10^{10}$ л = $6,3 \cdot 10^9$ л больше, т.е. всего уйдёт $2,72 \cdot 10^{10}$ л «грязной» воды.

В таблице 3 представлен водный баланс и оценки его параметров для озера Кызылташ, полученные на основе динамики ОА трития и начального объёма $V_0 = 8,4 \cdot 10^{10}$ л в зависимости от параметра δ .

На рисунке 6 представлены зависимости параметров μ и γ от выбранного значения параметра δ . Регрессионный линейный анализ показал, что происходило уменьшение параметра μ при увеличении параметра δ , и наоборот – увеличение параметра γ . При этом относительное изменение параметра γ было выше (увеличился в 1,4 раза), чем относительное изменение параметра μ (уменьшился в 1,04 раза) при крайних значениях δ .

Полученные эмпирические данные и проведенные теоретические расчёты указывают на то, что расходная часть водного баланса водоема в безледоставный период больше его приходной части. Расходная часть водного баланса в 2021 г. только за счет испарения составила 12,2 млн м³, или 44,9% от общей, равной 27,2 млн м³ при $\delta = 0,075$. Остальная вода в объеме 15 млн м³ была использована для нужд предприятия ПО «Маяк» и инфильтрована в грунт, что характерно для горных озёр [3]. Полученная модель позволила расширить область изучения гидродинамики различных типов водоемов [11, 14].

Заключение

В результате проведенных исследований по оценке уровня годового поступления трития в воздух с поверхности озера Кызылташ в современных условиях было установлено:

1. Среднее значение уровня ОА трития в озере Кызылташ за безледоставный период в 2021 г. более чем в 2 раза превышало уровень вмешательства по НРБ-99/2009.

Таблица 3

Водный баланс и оценки его параметров для озера Кызылташ, полученные на основе динамики ОА трития и начального объёма в зависимости от параметра δ

[Table 3]

Water balance and estimates of its parameters for lake Kyzyltash obtained based of tritium VA dynamics and initial volume depending on parameter δ

δ , доля [δ , fraction]	Подгонка МНК [Fitting LSM]		Оценка остальных параметров озера Кызылташ [Evaluation of the remaining parameters of the lake. Kyzyltash]				
	A_0/μ , Бк*сут/л [A_0/μ , Bq*d/l]	γ , сут [γ , d ⁻¹]	μ , л/сут [μ , l/d]	Равновесный объём, μ/γ , л [Equilibrium volume μ/γ , l]	Приход, л [Intake, l]	Расход, л [Removal, l]	Разница, л [Difference, l]
0	1,446E+07	1,224E-03	1,028E+08	8,400E+10	2,159E+10	2,159E+10	0,000E+00
0,01	1,452E+07	1,274E-03	1,025E+08	8,042E+10	2,152E+10	2,236E+10	-8,400E+08
0,02	1,458E+07	1,323E-03	1,020E+08	7,707E+10	2,141E+10	2,309E+10	-1,680E+09
0,03	1,464E+07	1,374E-03	1,016E+08	7,395E+10	2,134E+10	2,386E+10	-2,520E+09
0,04	1,470E+07	1,425E-03	1,012E+08	7,101E+10	2,125E+10	2,461E+10	-3,360E+09
0,05	1,476E+07	1,476E-03	1,007E+08	6,824E+10	2,115E+10	2,535E+10	-4,200E+09
0,06	1,482E+07	1,528E-03	1,003E+08	6,564E+10	2,106E+10	2,610E+10	-5,040E+09
0,07	1,488E+07	1,580E-03	9,982E+07	6,318E+10	2,096E+10	2,684E+10	-5,880E+09
0,08	1,495E+07	1,633E-03	9,937E+07	6,085E+10	2,087E+10	2,759E+10	-6,720E+09
0,09	1,501E+07	1,687E-03	9,896E+07	5,866E+10	2,078E+10	2,834E+10	-7,560E+09
0,10	1,508E+07	1,741E-03	9,849E+07	5,657E+10	2,068E+10	2,908E+10	-8,400E+09

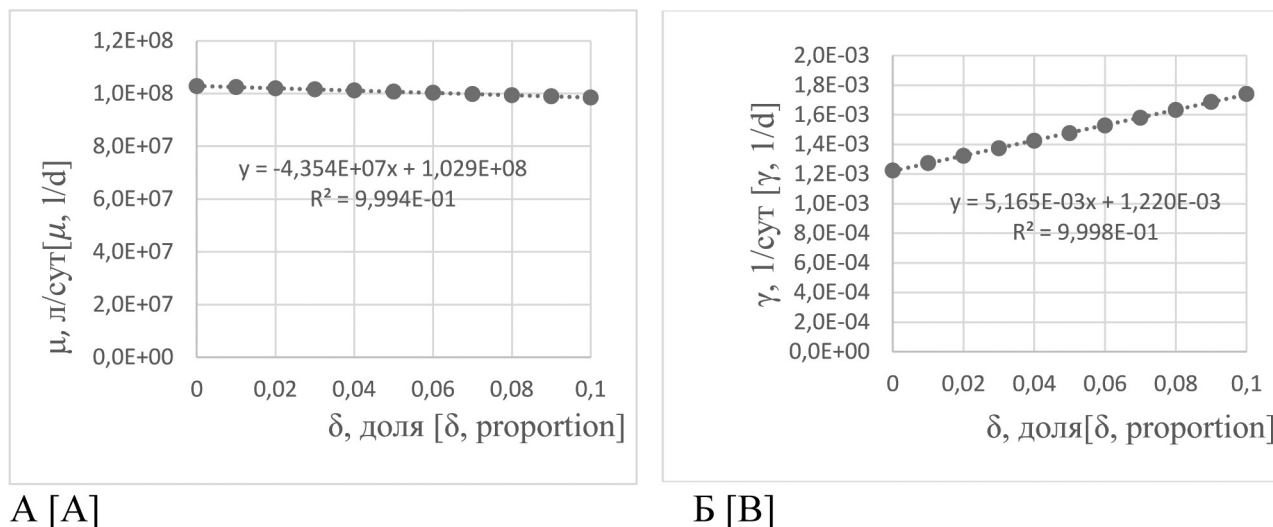


Рис. 6. Зависимость параметров и от значения параметра
[Fig. 6. Dependence of parameters and from parameter value]

2. Годовое поступление трития в воздух при испарении с озера Кызылташ составило 196 ТБк. Этот показатель на порядок ниже выбросов в атмосферу трития ПО «Маяк» (2020 г.) и близок к значениям суммарных выбросов всех остальных предприятий РФ, осуществляющих регламентируемые выбросы трития в атмосферу в 2020 г. (179 ТБк).

2. При неравномерном поступлении трития в атмосферу по месяцам максимальные значения были установлены в мае и июне 2021 г.

3. Наблюдался тренд снижения среднемесячной ОА трития в водоеме в безледоставный период.

4. Модель изменения уровня ОА трития в водоеме в зависимости от времени позволяет прогнозировать санитарно-гигиенические и гидрологические показатели водоема с позиции радиационной безопасности и рассчитывать водный баланс водоема в отдельные промежутки времени.

Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам за ценные замечания, которые способствовали улучшению качества публикации.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена в рамках Государственной программы Российской Федерации «Развитие здравоохранения» по контракту № 11.301.21.0 шифр «Кызылташ-21», финансируемому ФМБА России.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Востротин В.В.:

- существенный вклад в разработку концепции исследования; сбор, анализ и интерпретация данных;
- написание текста статьи и ее редактирование для важного интеллектуального содержания;

– утверждение окончательного варианта статьи для публикации;

– согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой части работы.

Янов А.Ю.:

- существенный вклад в разработку концепции исследования; сбор, анализ, интерпретация данных;
- написание текста статьи и ее редактирование для важного интеллектуального содержания;
- согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой части работы.

Литература

1. Сайт «Озёра России». URL: <https://ozera.info/lakes/about/gvr/list-lakes/kyzyl-tash> (Дата обращения 25.03.2022 г.)
2. Екидин А.А., Антонов П.Л., Жуковский М.В. Оценка загрязнения атмосферы тритием при испарении воды с поверхности промышленных водоемов // Вопросы радиационной безопасности. 2012. № 3. С. 3-10.
3. Андреева М.А. Озера среднего и Южного Урала. Челябинск, 1975. 270 с.
4. Толстикова В.С. Кузнецов В.Н. Ядерное наследие на Урале: исторические оценки и документы. Екатеринбург, 2017. 400 с.
5. Баторшин Г.Ш., Мокров Ю.Г., Алексахин А.И. Концепция вывода из эксплуатации водоемов-хранилищ ЖРО ФГУП «ПО «Маяк». VII Международный промышленный форум «АТОМЭКО – 2013». М., 2013.
6. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2020 г. Ежегодник. Обнинск, 2021. 239 с.
7. Чеботина М.Я., Николин О.А., Смагин А.И., Мурашова Е. Тритий в водоемах производственного и комплексного назначения в районе ПО «Маяк» на Урале // Водное хозяйство России. 2011. № 4. С. 75-84.
8. Vostrotin V.V., Yanov A.Y., Finashov L.V. Tritium in environmental objects in the area affected by FSUE Mayak Production

- Association in 2014-15 // Journal of Radiological Protection. 2021. Vol. 41, № 2. P. S56-S66. DOI 10.1088/1361-6498/abe8c8.
9. Иванов Н.Н. Об определении величины испаряемости // Известия Всесоюзного географического общества. 1954. Т. 86, № 2. вып. 1. С. 189–196.
 10. Сайт компании ООО «Расписание Погоды». URL: <https://rp5.ru>. (Дата обращения 25.03.2022).
 11. Busigin A., Kalyanam K.M., Sood S.K. Estimation of the tritium release rate from a spill of tritiated water // Fusion Technology. 1992. Vol. 21, No 2P2. P. 512-517. DOI: 10.13182/FST92-A29798.
 12. Yoshinori S. Lake water mixing and tritium balance in lake Chuzenji // Geographical Review of Japan. 1983. Vol. 56-10. P. 667-678.

Поступила: 18.05.2022 г.

Востротин Вадим Владимирович – кандидат биологических наук; заведующий лабораторией радиационной безопасности, Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства России. **Адрес для переписки:** 456780, Россия, Челябинская область, Озёрск, Озёрское шоссе, д. 19; E-mail: vostrotin@subi.su

Янов Александр Юрьевич – кандидат биологических наук; научный сотрудник лаборатории радиационной безопасности, Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства России, Озёрск, Россия

Для цитирования: Востротин В.В., Янов А.Ю. Оценка уровня годового поступления трития в воздух с поверхности озера Кызылташ // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 88-96. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-88-96

Assessment of the level of annual intake of tritium into the air from the surface of the lake Kyzyltash

Vadim V. Vostrotin, Aleksandr Yu. Yanov

Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency, Ozersk, Russia

The paper presents the results of research of the levels of tritium volume activity in lake Kyzyltash, a water storage reservoir for liquid radioactive waste from Mayak Production Association. Insufficient knowledge of the ways of migration of tritium from the reservoir and their quantitative assessment in modern conditions does not allow to fully objectively assess and predict the impact of the object of "nuclear heritage" on the population of Ozersk and the environment. The research was aimed at obtaining scientific results, which will be the starting point for the formation of a tritium monitoring program for industrial reservoirs by Mayak Production Association. The purpose of the study was assessment of the dynamics of tritium volume activity in the lake Kyzyltash, assessment of water balance parameters and the level of tritium intake into the air from its surface during the ice-free period. A total of 33 water samples were collected. The average tritium volume activity in 2021 made $1,57E+04$ Bq/l, SD – $1,1E+03$ Bq/l that more than 2 times exceeds the intervention level. A trend of decrease in the average monthly tritium volume activity in the reservoir during the observation period was revealed. In the course of calculations, it was stated that in the course of evaporation during the ice-free period the 196 TBq of tritium entered the air from lake Kyzyltash surface that is comparable with releases from all the Russia facilities (179 TBq) except Mayak Production Association. The obtained values of evaporated tritium make 13% from atmospheric tritium releases of Mayak Production Association in 2020. A total of ~12,2 million m³ had evaporated from the water reservoir surface in the study period. The model of dependence of tritium volume activity from time in lake Kyzyltash in 2021 and using of exponentially decreasing function allowed defining water balance of lake Kyzyltash in the ice-free period with 6,3 million m³ deficiency. Research of the model parameters allow prediction of sanitary and hygienic characteristics of the water reservoir from the point of view of radiation safety and calculation of water balance of the reservoir in certain periods of time.

Key words: tritium, lake Kyzyltash, tritium migration, water balance, Mayak Production Association.

Vadim V. Vostrotin

Southern Urals Biophysics Institute

Address for correspondence: Ozerskoe шоссе, 19, Ozersk, 456780, Chelyabinsk oblast, Russia; E-mail: vostrotin@subi.su

Information about the personal contribution of the authors to the work on the article

Vostrotin V.V.:

- significant contribution to the development of the research concept; data collection, analysis and interpretation;
- writing the text of the article and editing it for important intellectual content;
- approval of the final version of the article for publication;
- consent to be responsible for all aspects of the article, ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy or integrity of any part of the work.

Yanov A.Yu.:

- significant contribution to the development of the research concept; data collection, analysis, interpretation;
- writing the text of the article and editing it for important intellectual content;
- consent to be responsible for all aspects of the article, ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy or integrity of any part of the work.

Acknowledgment

The authors extend their deep gratitude to the reviewers for their valuable comments that contributed to improving the quality of the publication.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Funding

The work was carried out within the framework of the State Program of the Russian Federation "Development of Healthcare" under contract No. 11.301.21.0 cipher "Kyzyltash-21" funded by the FMBA of Russia.

References

1. The website of "Lakes of Russia". Available on: <https://oz-era.info/lakes/about/gvr/list-lakes/kyzyl-tash> (Accessed 25.03.2022) (In Russian).
2. Ekin AA, Antonov PL, Zhukovsky MV. Assessment of tritium air pollution regarding evaporation of water from industrial reservoirs. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Radiation safety issues*. 2012;3: 3-10. (In Russian).
3. Andreev MA. Lakes of Middle and Southern Urals. Chelyabinsk; 1975. 270 p. (In Russian).
4. Tolstikova VS, Kuznetsov VN. Nuclear heritage of the Urals: historical estimates and documents. Ekaterinburg; 2017. 400 p. (In Russian).
5. Batorshin GS, Mokrov YG, Aleksakhin AI. Conception of decommissioning water storage reservoirs with liquid radioactive waste of Mayak PA. VII International industrial forum "ATOMECO – 2013". Moscow; 2013. (In Russian).
6. Radiation situation in Russia and neighbor countries in 2020. Annual publication. Obninsk; 2021. 239 p. (In Russian).
7. Chebotina MY, Nikolin OA, Smagin AI, Murashova E. Tritium in water reservoirs of production and complex purpose close to Mayak PA. *Vodnoe khozyaystvo Rossii = Water management of Russia*. 2011;4: 75-84. (In Russian).
8. Vostrotin VV, Yanov AY, Finashov LV. Tritium in environmental objects in the area affected by FSUE Mayak Production Association in 2014-15. *Journal of Radiological Protection*. 2021;41(2): S56-S66. DOI 10.1088/1361-6498/abe8c8.
9. Ivanov NN. On the determination of the evaporation rate. *Izvestiya Vsesoyuznogo geograficheskogo obshchestva = News of the All-Union Geographical Society*. 1954;2:86(1): 189–196. (In Russian).
10. Website "Weather Schedule". Available on: <https://rp5.ru>. (Accessed 25.03.2022). (In Russian).
11. Busigin A, Kalyanam KM, Sood SK. Estimation of the tritium release rate from a spill of tritiated water. *Fusion Technology*. 1992;21(2P2): 512-517. DOI: 10.13182/FST92-A29798.
12. Yoshinori S. Lake water mixing and tritium balance in lake Chuzenji. *Geographical Review of Japan*. 1983;56-10: 667-678.

Received: May 18, 2022

For correspondence: Vadim V. Vostrotin – PhD, head of the laboratory of the radiation protection of Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency of Russia (Ozerskoe shosse, 19, Ozersk, 456780, Chelyabinsk region, Russia; E-mail: vostrotin@subi.su)

Aleksandr Yu. Yanov – PhD, Scientist, laboratory of radiation protection of Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency of Russia, Ozersk, Russia

For citation: Vostrotin V.V., Yanov A.Yu. Assessment of the level of annual intake of tritium into the air from the surface of the lake Kyzyltash. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 4. P. 88-96. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-88-96