

Оценка поступления трития в воздух от прибрежных растений озера Кызылташ в 2021 г.

В.В. Востротин, Л.В. Финашов

Южно-Уральский институт биофизики, Озёрск, Челябинская область, Россия

Целью исследования являлось определение уровня годового поступления трития в воздух от прибрежных растений озера Кызылташ в 2021 г. и соответствие содержания трития в воздухе прибрежной зоны озера Кызылташ нормам радиационной безопасности. В мае – сентябре 2021 г. было проведено исследование прибрежных растений вблизи озера Кызылташ, являющегося технологическим водоёмом производственного объединения «Маяк». На расстоянии до 100 м от берега влажность растений находилась в диапазоне 41–87%, уровень объёмной активности трития в воде растений и транспирационной воде – от 96 Бк/л до ~8,0 кБк/л и от 64 Бк/л до ~9,0 кБк/л соответственно. По шкале Чеддока обнаружены ранговые корреляции между объёмной активностью трития и: временем от начала вегетационного периода (слабая обратная); расстоянием от берега (заметная обратная); влажностью растений (умеренная положительная). Для прогнозирования поступления трития в воздух в форме НТО в поствегетационный период были построены модели экспоненциального убывания влажности и объёмной активности трития в растениях в зависимости времени. Оценки общих периодов полураспада влажности и объёмной активности трития в воде растений составили 262 и 64 сут соответственно. Суммарное годовое поступление НТО в воздух в 2021 г. от прибрежных растений составило $6,92E+11$ Бк, со вкладом 0,35% от годового поступления трития с поверхности озера Кызылташ. Растения зоны 0...~5 м дают 81,8% от суммарного годового поступления от прибрежных растений озера Кызылташ ($5,66E+11$ Бк). Годовое поступление НТО только от растений береговой линии озера Кызылташ (0...~5 м), равное ($5,66E+11$ Бк), было сопоставимо с выбросами трития в 2021 г. от Курской АЭС ($5,32 E+11$ Бк), а поступление трития от всех прибрежных растений озера Кызылташ – с выбросами Ленинградской АЭС ($6,90E+11$ Бк). Средняя объёмная активность НТО в воздухе прибрежной зоны озера Кызылташ в ходе 2 экспедиций при отсутствии осадков составляла ~60 Бк/м³, что в ~30 раз меньше допустимой объёмной активности трития во вдыхаемом воздухе для населения, равной $1,9E+3$ Бк/м³ согласно НРБ-99/2009. В случае гипотетического проживания на берегу озера Кызылташ в 2021 г. и постоянного уровня объёмной активности трития в объектах окружающей среды годовая ожидаемая эффективная доза внутреннего облучения, обусловленная ингаляцией паров сверхтяжёлой воды, согласно НРБ-99/2009, для стандартных условий составит 31 мкЗв/год для критической группы детей возраста 1–2 года и 8,7 мкЗв/год для взрослого населения. Данные оценки являются консервативными, так как не учитывают ледоставный период, в течение которого испарение воды с поверхности озера Кызылташ и поступление из растений практически отсутствует.

Ключевые слова: тритий, растения, береговая линия, транспирация, воздух, озеро Кызылташ, производственное объединение «Маяк».

Введение

Тритий отнесен к числу 7 наиболее опасных радионуклидов, являясь радиоактивным изотопом водорода, обладает высокой миграционной способностью и быстрым включением в обменные процессы и структуры окружающей среды, мгновенно поступая во все звенья экологического кругооборота, замещая водород и обуславливая разрывы в цепочках РНК и ДНК в биологических

структурах всех живых организмов [1]. Очистка выбросов и сбросов от трития, образующегося в процессе эксплуатации предприятий атомной промышленности и ядерной энергетики, является методически сложной задачей [2]. Тритий оказывает радиационное воздействие на население и окружающую среду и включён в перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования¹ [3].

¹ Постановление правительства РФ № 1316-п от 08.07.2015 г. (с изменениями на 10 мая 2019 г.) [Decree of the Government of the Russian Federation no. 1316-r of 08.07.2015 (as amended as of May 10, 2019) (In Russ.)]

Востротин Вадим Владимирович

Южно-Уральский институт биофизики

Адрес для переписки: 456783, Россия, Челябинская область, г. Озёрск, ш. Озёрское, 19; e-mail: vostrotin@subi.su

При нормальной эксплуатации международного экспериментального термоядерного реактора (ITER) прогнозируемая максимальная масса трития во всей установке в 2025 г. составит 4 кг ($\sim 1,4E+18$ Бк). При этом оценка поступления трития в окружающую среду, в основном в виде паров сверхтяжелой воды (НТО или T2O), будет равна приблизительно 2,5 г/год ($\sim 1,3E+14$ Бк/год для НТО) в годы интенсивного обслуживания и 0,6 г/год ($\sim 3,2E+13$ Бк/год для НТО) при штатной работе реактора. Для работы коммерческого термоядерного реактора будет необходимо ежегодно 55,8 кг трития на 1000 МВт мощности, что потребует увеличения производства трития по всему миру [4].

Исследования, направленные на изучение путей миграции трития в системе вода – воздух – почва – растения вблизи предприятий атомной промышленности и ядерной энергетики, позволят прогнозировать в будущем радиоэкологическую обстановку рядом с объектами термоядерной энергетики. Существующие модели распределения трития в окружающей среде имеют свои ограничения, так как многие параметры этих моделей получены экспериментально при периоде наблюдения менее 1 года [5, 6].

Озеро Кызылташ (Водоем В-2) является открытым хранилищем естественного происхождения жидких радиоактивных отходов (ЖРО) производственного объединения (ПО) «Маяк» и находится внутри его санитарно-защитной зоны (СЗЗ). В 2021 г. объёмная активность (ОА) трития в воде озера составляла ~ 16 кБк/л, что привело в процессе испарения к поступлению $1,96E+14$ Бк в воздух с поверхности, сопоставимому как с выбросами трития от всех предприятий РФ, кроме ПО «Маяк» ($1,79E+14$ Бк), так и с прогнозным уровнем поступления трития в окружающую среду в годы интенсивного обслуживания термоядерного реактора ITER [4, 7]. Водоем В-2 весь свой период эксплуатации, начиная с 1946 г., как водоем-охладитель являлся основным источником поступления воды с высоким содержанием трития в окружающую среду [8]. Растения, находящиеся вблизи данного водоема, длительный период времени абсорбировали тритий в форме НТО, как через корневую систему, так и через воздух. Таким образом, вблизи озера Кызылташ сформировалась экосистема, с 1946 г. подвергавшаяся воздействию трития.

Транспирация является важным механизмом регуляции водно-солевого обмена растения с окружающей средой, который создает автоматичность водного тока: поступление воды в растение и её испарение [9]. В ходе вегетационного периода прибрежные растения озера Кызылташ за счёт транспирации активно испаряли воду, что приводило к увеличению поступления НТО в воздух и усилению воздействия ПО «Маяк» на окружающую среду.

Таким образом, оценка уровня годового поступления трития в форме НТО в воздух от прибрежных растений озера Кызылташ в современных условиях является актуальным исследованием, как с точки зрения радиационной гигиены, так и с точки зрения получения новых данных о миграции трития в системе вода – растения – воздух.

Цель исследования – определение уровня годового поступления трития в форме НТО в воздух от

прибрежных растений озера Кызылташ в 2021 г. и соответствие содержания трития в воздухе прибрежной зоны озера Кызылташ нормам радиационной безопасности.

Материалы и методы

Для достижения цели исследования были выполнены следующие задачи:

1. Определение зависимостей от расстояния до береговой линии и времени вегетационного периода следующих параметров прибрежных растений озера Кызылташ:
 - а) влажности;
 - б) ОА НТО внутриклеточной воды (ВВ);
 - в) ОА НТО в транспирационной воде (ТВ).
2. Расчёт площади прибрежных растений озера Кызылташ.
3. Создание методики оценки поступления НТО в воздух от прибрежных растений.
4. Измерение ОА НТО в воздухе прибрежной зоны озера Кызылташ.

Для достижения цели исследования была разработана программа радиоэкологического стационарного сезонного исследования внутри СЗЗ ПО «Маяк», проведённого вблизи озера Кызылташ в районе «Метеостанции» (рис. 1).

Предполагалось, что вегетационный период растений прибрежной зоны озера Кызылташ в 2021 г., начавшийся 1 мая и закончившийся 13 октября, был продолжительностью 166 сут.

На основе программы полевого радиоэкологического исследования было организовано 5 экспедиций (17.06.2021 г. – 48 сут от начала вегетационного периода; 01.07.2021 г. – 62 сут; 15.07.2021 г. – 77 сут; 19.08.2021 г. – 113 сут; 02.09.2021 г. – 127 сут), в ходе которых у береговой линии (0...~5м) и на расстояниях 10, 50 и 100 м от береговой линии: в течение 1 ч собирались пробы травы и листьев (всего 40 проб), а в течение от 1 до 5 сут – пробы транспирационной воды берёз (всего 20 проб).

В 3 экспедициях (17.06.2021 г., 01.07.2021 г., 02.09.2021 г.) отбирался конденсат воздуха в точках, обозначенных на рисунке 1 как «Гаражи» (номер 2) – 100 м от береговой линии озера Кызылташ и «Полигон» (номер 3) – непосредственно на берегу и в 20 м от берега с одновременным измерением температуры, влажности и давления. Время пробоотбора составляло $\sim 10...20$ мин, время перемещения между точками отбора – ~ 15 мин. Выбор точек сбора конденсата воздуха был продиктован возможностью транспортировки промышленного осушителя воздуха с размером 580 мм $\times$ 600 мм $\times$ 1035 мм и массой 66 кг, а также возможностью подключения его к источнику мобильного электрогенератора.

Лесной массив санитарно-защитной зоны озера Кызылташ

Лесной массив вблизи озера Кызылташ являлся смешанным лесом и был представлен широколиственными и хвойными породами деревьев. Деревья в основном были представлены берёзой повислой (*Betula pendula* Roth.) и осинкой обыкновенной (*Populus tremula* L.), хвойные в основном представлены сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris*).

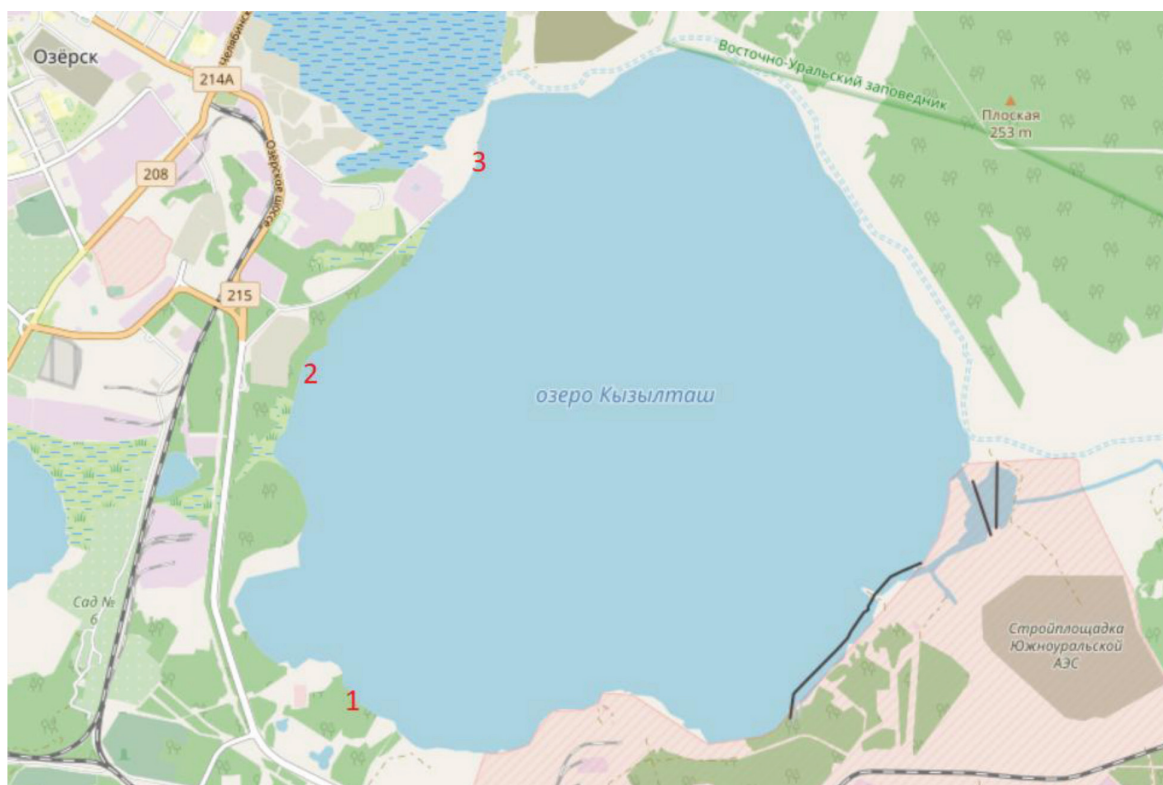


Рис. 1. Места отбора проб оз. Кызылташ в 2021 г. с использованием данных сайта www.openstreetmap.org. Отмечены номерами 1 («Метеостанция»), 2 («Гаражи») и 3 («Полигон»)

[Fig. 1. A place of sampling from Lake Kyzyltash in 2021 based on the data from the site www.openstreetmap.org. “Meteorological station” is marked with 1, “garage” – 2 and “teste site” – 3]

Травяной напочвенный покров санитарно-защитной зоны озера Кызылташ

При осуществлении стационарного радиоэкологического исследования было выявлено, что есть 2 фитоценоза. Первый фитоценоз береговой линии (0 до ~ 10 м от озера Кызылташ) представлял собой разнотравно-злаковый луг с заметным участием мезофильного и гигро-мезофильного разнотравья.

Второй травяной фитоценоз располагался на расстоянии от ~ 10 до 100 м от береговой линии озера Кызылташ. В основном, он был представлен полидоминантным низкотравным разнотравно-злаковым лугом с преобладанием многолетних злаковых, зарослями кустарников и отдельными деревьями.

Подготовка проб транспирационной воды листьев берёзы и изготовление счетных образцов

На каждом из участков отбирались пробы не менее чем от 5 деревьев. На ветки берёзы с листвою надевали полиэтиленовый пакет типа ZipLock с внешней площадью одной стороны 0,05 м². Через 1...5 сут составляли объединённую пробу с каждого из участков. Объём объединённой пробы ТВ измеряли весовым методом с помощью весов ВЛ-124 при предполагаемой плотности 1,0 кг/л. Уровень ОА НТО в

объединённой пробе ТВ определялся в соответствии с МИ (Методика выполнения измерения объёмной активности трития в пробах воды и мочи с использованием жидко-сцинтилляционного спектрометра Quantulus-1220)².

Подготовка проб травы, листьев берёзы и изготовление счетных образцов

Сбор травы осуществлялся у береговой линии и на расстояниях 10, 50 и 100 м от береговой линии на одном расстоянии от уреза воды. Собранные образцы травы смешивались, образуя объединённую пробу. Сбор проб листьев берёзы осуществлялся не менее чем от 5 деревьев, растущих на одинаковом расстоянии от уреза воды, образуя объединённую пробу.

С целью определения ОА НТО в ВВ растений и листьев берёзы часть сырой, объединённой пробы помещалась в стеклянные герметичные ёмкости вместимостью 1 л с притёртой крышкой, в которые предварительно насыпалось 100 г силикагеля КСМГ ГОСТ 3956-76, прокалённого в сушильном шкафу ШСЛ-43.250 в течение 3 ч при температуре 150°C. Между силикагелем и пробой укладывалась фильтровальная бумага. Ёмкости ставились в тёмное помещение на 3 сут при комнатной температуре для адсорбции воды из растительного материала. Через 3 сут

² Методика выполнения измерений объёмной 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 No 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.)].

растительный материал извлекался из ёмкости, силикагель засыпался в круглодонную колбу вместимостью 0,5 л. Колба помещалась в колбонагреватель для испарения воды из силикагеля. Уровень ОА НТО в полученной пробе воды из растений определялся в соответствии с МИ².

Для определения влажности объединённой пробы растительного материала измерялась начальная масса сырой пробы с помощью весов ВК 3000.1. Затем проба высушивалась в течение 7–10 дней в закрытом помещении при комнатной температуре ~25...30°C в режиме микропродувания, с последующим досушиванием в бытовой сушке в течение 3–12 ч. Проводилось измерение массы сухой объединённой пробы растительного материала. Оценка влажности объединённой пробы растительного материала определялась согласно ОФС.1.5.3.0007.15 (Определение влажности лекарственного растительного сырья)³. Оценка влажности объединённой пробы растительного материала W , % была равна:

$$W = \frac{(m_w - m_d) \cdot 100}{m_w}, \% \quad (1)$$

где:

m_w – масса сырой пробы, г;

m_d – масса воздушно-сухой пробы, г.

Подготовка проб воздуха и изготовление счетных образцов

С целью измерения ОА НТО в воздухе отбирался конденсат воздуха в 2 точках, обозначенных на рисунке 1 «Гаражи» (номер 2) 100 м от береговой линии озера Кызылташ и «Полигон» (номер 3) непосредственно на берегу и в 20 м от берега с одновременным измерением температуры, влажности и давления.

Отбор проб воздуха производился с помощью промышленного осушителя воздуха «MASTER DH 92 Dehumidifier», позволяющего конденсировать не менее 20 см³ воды из воздуха в течение 1 ч. Время отбора пробы воздуха составляло ~10...20 мин. Полученная проба конденсата воды переливалась в стеклянную банку вместимостью 50...100 см³, снабжённую этикеткой, с плотно закрывающимися крышками. На этикетку банки наносилась следующая информация: место размещения промышленного осушителя воздуха; дата и время отбора пробы; результат измерения температуры воздуха, °C; результат измерения относительной влажности воздуха, %; результат измерения атмосферного давления, мм рт. ст. Измерение температуры, влажности и давления воздуха производилось с помощью термогигрометра ИВТМ-7М со встроенным датчиком атмосферного давления.

Уровень ОА НТО в пробе воды конденсата воздуха определялся в соответствии с МИ².

Значение ОА НТО в воздухе определяли на основе абсолютной влажности воздуха, рассчитываемой по уравнению Менделеева – Клапейрона для идеальных газов с использованием оценки насыщенного давления водяного пара воздуха для диапазона от -45°C до 60°C из

Руководства по метеорологическим приборам и методам наблюдений [10].

Расчёт площади исследованной зоны вокруг озера Кызылташ и площади крон деревьев

Для расчёта площади исследованных зон вокруг озера Кызылташ и площади крон деревьев, произрастающих на них, использовались спутниковые снимки высокого разрешения, предоставляемые сервисом Google Earth⁴. Была использована дата снимка района озера Кызылташ от 12.06.2021 г. Вся изучаемая область санитарно-защитной зоны озера Кызылташ была разделена на 21 район. Встроенный в Google Earth сервис расчёта площади использовался следующим образом. С использованием встроенной координатной сетки были установлены маркеры по береговой линии озера Кызылташ, ~5 м и от ~5 до 100 м от береговой линии. На основании установленных маркеров измерялась площадь крон деревьев, произрастающих в данных районах на удалении ~5 м и от ~5 до 100 м от береговой линии.

Статистическая обработка данных

Для построения графиков и статистической обработки данных использовалась офисная программа Microsoft Excel и статистический пакет R версии 4.0.2 «Taking Off Again». Уровень статистической значимости был принят равным 5%.

Методика оценки уровня поступления трития в воздух в форме паров НТО от прибрежных растений озера Кызылташ

Для оценки уровня годового поступления НТО в воздух от прибрежных растений озера Кызылташ были приняты следующие допущения:

1. Травяной напочвенный покров равномерно покрывал площадь зоны от 0 до ~5 м озера Кызылташ и площадь зоны от ~5 до 100 м от береговой линии. Соответственно, площадь поверхности травы равна площади почвы одной из зон, умноженной на индекс листовой поверхности.
2. Вегетационный период в 2021 г., начавшийся 1 мая и закончившийся 13 октября, продолжался 166 сут.
3. В вегетационный период из опавших листьев и отмерших надземных частей растений в процессе суточных колебаний температур (циклы заморозка, оттаивания), вся ВВ, содержащая тритий, выходит из разрушенных клеток и испаряется, поступая в окружающую среду.
4. Масса отмерших надземных частей растений (травы) площадью 1 м² равна 1,5 кг [11].
5. Масса опавших листьев площадью 1 м² равна 0,1 кг [12].
6. Интенсивность транспирации растений, по литературным данным, с площади поверхности 1 м² составляет 15...250 г днём и 1...20 г ночью [9]. При равномерных законах распределения указанных величин и плотности ТВ 1 кг/л средневзвешенная интенсивность транспирации растений равна 0,143±0,068 л/(м²·сут), со стандартной относительной неопределённостью 48%.

³ Общая фармакопейная статья 1.5.3.0007.15 Определение влажности лекарственного растительного сырья [General monograph 1.5.3.0007.15 Determination of moisture of medicinal plant raw material. (In Russ.)] <http://pharmacopoeia.ru/wp-content/uploads/2016/08/OFS.1.5.3.0007.15-Opredelenie-vlazhnosti-lekarstvennogo-rastitelnogo-syrya.pdf>

⁴ Сайт <https://earth.google.com/web/@55.72037356,60.7361111,226.02947874a,289.03866329d,35y,0h,0t,0r> (Дата обращения 14.10.2021)

7. Индекс листовой поверхности, по литературным данным, в среднем для лесов России равен $5,5 \text{ м}^2/\text{м}^2$ как для травы, так и для листьев деревьев [13].

8. Плотность ВВ равна 1 кг/л .

9. Весь лесной массив СЗЗ озера Кызылташ представлен листопадными деревьями.

10. В поствегетационный период транспирация полностью прекращается.

Уровень годового поступления трития в воздух в форме НТО от прибрежных растений озера Кызылташ оценивался как сумма 2 поступлений в вегетационный $A_{\text{тра}}^{\text{раст}}$ и поствегетационный $A_{\text{пост}}^{\text{раст}}$ периоды, выраженных в Бк.

Оценка активности НТО, поступающего в процессе транспирации в течение вегетационного периода 2021 г. от травы и через листья деревьев, произрастающих вокруг озера Кызылташ, была равна:

$$A_{\text{тра}}^{\text{раст}} = A_{\text{тра}}^{\text{тр}} + A_{\text{тра}}^{\text{л}} = T \times L \times V \times \left(\sum_{i=1,2} S_i \cdot \gamma_{i,\text{тр}} \cdot k_{i,\text{тр}} + S_{i,\text{д}} \cdot \gamma_{i,\text{д}} \right), \quad (2)$$

где:

$A_{\text{тра}}^{\text{тр}}$ – активность НТО, поступившего в процессе транспирации в течение вегетационного периода 2021 г. от травы, произрастающей в исследованных зонах озера Кызылташ, Бк;

$A_{\text{тра}}^{\text{л}}$ – активность НТО, поступившего в процессе транспирации в течение вегетационного периода 2021 г. от деревьев, произрастающих в исследованных зонах озера Кызылташ, Бк;

T – время вегетационного периода 2021 г., сут;

$i=1,2$ – индекс зоны на удалении $0 \dots \sim 5$ и $\sim 5 \dots 100$ м от береговой линии озера Кызылташ;

S_i – площадь почвы в i -й зоне озера Кызылташ, м^2 ;

V – интенсивность транспирации, $\text{л}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$;

L – индекс листовой поверхности, $\text{м}^2/\text{м}^2$;

$\gamma_{i,\text{тр}}$ – оценка ОА НТО ВВ проб травы в i -й зоне озера Кызылташ, Бк/л;

$k_{i,\text{тр}}$ – коэффициент перехода от ОА НТО ВВ проб травы в i -й зоне озера Кызылташ к ОА НТО транспирационной воды травы ($k_{1,\text{тр}} = 3,25$; $k_{2,\text{тр}} = 1,34$, см. ниже в разделе «Результаты и обсуждение»);

$S_{i,\text{д}}$ – площадь кроны деревьев в i -й зоне озера Кызылташ, м^2 ;

$\gamma_{i,\text{д}}$ – оценка ОА НТО ТВ листьев березы в i -й зоне озера Кызылташ, Бк/л.

Оценка активности НТО, поступившего в воздух в поствегетационный период с отмершими надземными частями травы и листьями деревьев, произрастающих вокруг озера Кызылташ, была равна:

$$A_{\text{пост}}^{\text{раст}} = A_{\text{пост}}^{\text{трава}} + A_{\text{пост}}^{\text{лист}} = L \sum_{i=1,2} \frac{VA(t)_i}{\rho_{\text{воды}}} \sum_{j=1,2} S_{i,j} \cdot \mu_{i,j} \cdot \left(\frac{RH(t)_{i,j}}{100} \right), \quad (3)$$

где:

$A_{\text{пост}}^{\text{трава}}$ – активность НТО, поступившего в воздух в поствегетационном периоде 2021 г. с отмершими надземными частями травы, произрастающей в исследованных зонах озера Кызылташ, Бк;

$A_{\text{пост}}^{\text{лист}}$ – активность НТО, поступившего в воздух в поствегетационном периоде 2021 г. с опавшими листьями деревьев, произрастающих в исследованных зонах озера Кызылташ, Бк;

$i=1,2$ – индекс зоны на удалении $0 \dots \sim 5$ и $\sim 5 \dots 100$ м от береговой линии озера Кызылташ;

$j=1,2$ – индекс отмерших частей растений листьев крон деревьев ($j=1$) и травы ($j=2$);

$S_{i,j}$ – площадь почвы, занимаемой частями отмерших j -х растений в i -й зоне, м^2 ;

L – индекс листовой поверхности, $\text{м}^2/\text{м}^2$;

$\mu_{i,j}$ – средняя масса опавших j -х отмерших частей растений в i -й зоне на единицу площади, $\text{кг}/\text{м}^2$;

t – время с даты начала вегетационного периода, сут;

$RH(t)_{i,j}$ – модельное значение влажности проб j -х отмерших частей растений в i -й зоне в конце вегетационного периода наблюдения 13.10.2021 г., по регрессионным моделям по формуле 4 (на дату 13.10.2021 г., равную 166 сут от начала отсчёта), %;

100 – коэффициент перехода от доли к процентам, %;

$VA(t)_i$ – модельная ОА НТО ВВ проб отмерших частей растений в i -й зоне в конце вегетационного периода наблюдения 13.10.2021 г., по регрессионным моделям по формуле 5 (дата 13.10.2021 равна 166 сут от начала отсчёта), произрастающих в исследованных зонах озера Кызылташ, Бк/л;

$\rho_{\text{воды}}$ – плотность ВВ, кг/л .

Результаты и обсуждение

Результаты тестов ранговой корреляции по Спирмену для изучаемых параметров представлены в таблице 1. ОА НТО ВВ травы и листьев берёз, а также ТВ берёз име-

Таблица 1

Уровни выявленных статистически значимых ранговых корреляций по Спирмену между изучаемыми параметрами и факторами влияния. Коэффициенты корреляции приведены с ошибками первого рода и количеством пар в каждой выборке

[Table 1]

Levels of detected statistically significant Spearman rank correlation between studied parameters and factors of influence. Correlation factors are given with errors of first kind and number of pairs in every sample

Изучаемые параметры [Studied parameters]	Факторы влияния [Factors of influence]		
	Время от начала вегетационного периода, сут [Time from the beginning of the vegetation period, days]	Расстояние от озера Кызылташ, м [Distance from Lake Kyzyltash, m]	Влажность, % [Humidity, %]
ОА НТО ВВ растений и ТВ берёз, Бк/л* [VA НТО IW of plants and TW of birch-trees, Bq\l*]	-0,26 p=0,043 n=60	-0,67 p<10 ⁻⁶ n=60	0,35 p=0,025 n=40

Изучаемые параметры [Studied parameters]	Факторы влияния [Factors of influence]		
	Время от начала вегетационного периода, сут [Time from the beginning of the vegetation period, days]	Расстояние от озера Кызылташ, м [Distance from Lake Kyzyltash, m]	Влажность, % [Humidity, %]
Влажность, % [Humidity, %]	-0,48 p=0,0015 n=40	–	1,0

* – объёмная активность трития внутриклеточной воды растений и транспирационной воды берёз, Бк/л [Tritium volume activity of intracellular water of plants and transpiration water of birch-trees, Bq/l]

ла статистически значимые: обратную слабую по шкале Чеддока ранговую корреляционную связь со временем от начала вегетационного периода ($r=-0,26$), обратную заметную с расстоянием от берега озера Кызылташ ($r=-0,67$) и прямую умеренную ранговую корреляционную связь с влажностью проб растений ($r=0,35$). Последнее, возможно, связано с наличием в объединённой пробе крапивы двудомной (*Urtica dioica* L.) в отобранных с уреза проб травы, характеризующихся как большими значениями влажности, так и большими значениями ОА НТО ВВ.

Влажность проб растений имела статистически значимую обратную умеренную ранговую корреляционную связь с временем от начала вегетационного периода ($r=-0,48$). Было выявлено статистически значимое различие между медианами влажности травы и листьев берёзы (тест Вилкоксона, $W=80$, $p=8,4e-3$), равными 72,0% и 61,8% соответственно.

Из информации, представленной в таблице 1, следует, что в процессе вегетационного периода в пробах растений снижалась влажность, что подтверждается многочисленными исследованиями. Во время вегетационного периода растения постепенно накапливали органические вещества, что приводило к уменьшению содержания ВВ в конце вегетационного периода и, следовательно, к уменьшению влажности проб растений [6, 9, 14, 15].

Результаты измерения ОА НТО ВВ травы и листьев берёзы, а также ОА НТО ТВ берёзы (рис. 2) являлись исходными данными для оценки пространственного распределения ОА НТО в прибрежных растениях в зависимости от расстояния до берега озера Кызылташ.

По тестам Фридмана и апостериорному анализу (Post Hoc) было выявлено, что медианы ОА НТО ВВ травы и листьев берёзы и ТВ берёзы статистически значимо больше у береговой линии (ВВ травы: $p=0,004$, Post Hoc – различие между группой «Береговая линия» и всеми остальными, $p=0,05$; ВВ листьев берёзы: $p=0,03$, различия: между группой «Береговая линия» и ~10 м, $p=0,05$, между группой «Береговая линия» и ~100 м, $p=0,05$; ТВ берёзы: $p=0,004$, Post Hoc – различие между группой «Береговая линия» и всеми остальными, $p=0,05$). Таким образом, по ОА НТО ВВ травы и листьев берёзы и ТВ берёзы стоит различать только 2 зоны: зона береговой линии от 0 до ~5 м и зона от ~5 до 100 м от берега озера Кызылташ.

В таблице 2 представлены статистические характеристики ОА НТО в зависимости от исследованной пробы и зоны озера Кызылташ. Несмотря на практически двукратное превышение по среднему геометрическому значению, вследствие малого числа случаев отсутствовало статистически значимое различие между медианами ОА

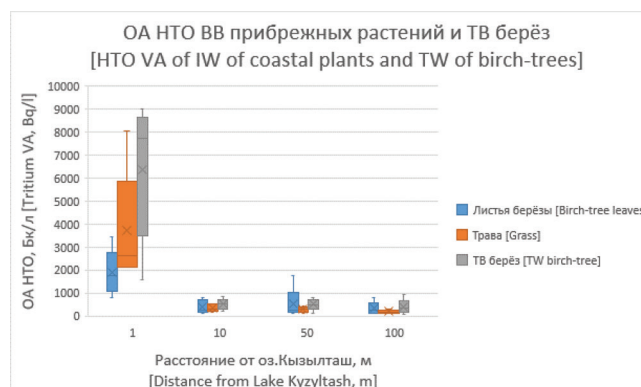


Рис. 2. Пространственное распределение объёмной активности НТО ВВ прибрежных растений и ТВ берёзы в зависимости от расстояния до озера Кызылташ: синий ящик – объёмная активность НТО внутриклеточной воды листьев берёзы; коричневый ящик – объёмная активность НТО внутриклеточной воды проб травы; серый ящик – объёмная активность трития транспирационной воды берёзы; крестик посередине ящика – среднее арифметическое по выборке; горизонтальная линия внутри ящика – медиана; нижняя и верхняя грань ящика – это межквартильный размах. Горизонтальные черточки на конце «усов» – максимальное и минимальное значение (без учета выбросов). Каждый ящик с усами представлен 5 измерениями)
Fig.2. Spacial distribution of HTO volume activity of IW of coastal plants and TW of birch-trees depending on the distance to Lake Kyzyltash.

(Note. Blue box – HTO volume activity of intracellular water of birch-tree leaves; brown box – tritium volume activity of intracellular water of grass samples; grey box – HTO volume activity of transpiration water of birch-trees. A cross in the middle of the box – arithmetic mean of the sample. Horizontal line inside the box – median. Lower and upper sides of the box – interquartile range. Horizontal dashes at the end of “mustache” – maximum and minimum values (excluding releases).

Each box with “mustache” is presented by 5 dimensions]

НТО ВВ травы и листьев берёзы в зоне 0...~5 м от берега (тест Вилкоксона, $W=3$, $p=0,056$).

Очевидно, что растения береговой линии активно использовали воду озера Кызылташ, так как ОА НТО в пробах растений береговой линии была приблизительно на порядок величины больше ОА НТО растений зоны от ~5 до 100 м.

Согласно исследованиям специалистов ЮУриБФ, среднее значение уровня ОА трития в воде озера Кызылташ в мае – сентябре 2021 г. составило ~16 кБк/л [7]. Таким образом, в 2021 г. ОА НТО ВВ растений, растущих у береговой линии, была в ~5...10 раз ниже ОА НТО в воде озера Кызылташ.

Таблица 2

Статистические характеристики ОА НТО в исследованных пробах растений вблизи озера Кызылташ,
GM – среднее геометрическое, σ_g – стандартное геометрическое отклонение, n – число случаев

[Table 2]

Statistical characteristics of НТО VA in the investigated samples of plants near Lake Kyzyltash, GM – geometric mean,
 σ_g – standard geometric deviation, n – number of cases]

Проба [Sample]		Зона озера Кызылташ, м [Lake Kyzyltash zone, m]	
		0...~5	~5...100
BB[IW]	Трава [Grass]	GM=3220 Бк/л $\sigma_g=1,75, n=5$	GM=240 Бк/л $\sigma_g=1,72, n=15$
	Листья берёзы [Birch-tree leaves]	GM=1680 Бк/л $\sigma_g=1,72, n=5$	GM=290 Бк/л $\sigma_g=2,28, n=15$
TB[TW]	Берёза [Birch-trees]	GM=5471 Бк/л $\sigma_g=2,05, n=5$	GM=390 Бк/л $\sigma_g=2,10, n=15$

Транспирация травяного напочвенного покрова вблизи озера Кызылташ не определялась. Для оценки ОА НТО ТВ травы вычислялось соотношение между ОА НТО ВВ и ТВ берёз. Коэффициент перехода от ОА НТО ВВ листьев берёз к ОА НТО ТВ, оцененный по среднему геометрическому: на расстоянии 0...~5 м был равен $k_{1,тп} = 3,25$; при $\sigma_g=2,36$ (n=5); на расстоянии ~5...100 м равен $k_{2,тп} = 1,34$ при $\sigma_g=2,19$ (n=15). Исходя из допущения, что у трав, растущих на береговой линии озера Кызылташ, коэффициент перехода от ОА НТО ВВ к ОА НТО ТВ такой же, как у берёз, оценка ОА НТО ТВ трав, растущих на расстоянии 0...~5 м, была равна $3,22 \text{ Бк/л} \cdot 3,25 = 10,5 \text{ Бк/л}$, на расстоянии ~5...100 м равна $240 \text{ Бк/л} \cdot 1,34 = 322 \text{ Бк/л}$.

Для определения активности трития, поступившего в форме НТО в воздух в поствегетационном периоде в 2021 г., с отмершими надземными частями растений, произрастающими вблизи озера Кызылташ, была создана модель прогнозирования влажности проб растений. Учитывая наличие статистически значимой корреляции между влажностью проб растений и временем от начала наблюдения, а также статистически значимого различия между медианами влажности у 2 типов растений, была выбрана модель с общей скоростью экспоненциального убывания и частными начальными значениями влажности:

$$RH(t)_{i,j} = RH(0)_{i,j} * e^{-\alpha * t} \quad (4)$$

где:

$RH(0)_{i,j}$ – частное начальное значение влажности в i-й зоне для j-го типа растений, %;

α – общая скорость убывания влажности, сут⁻¹;

t – время от начала вегетационного периода, начиная с 01.05.2021 г., сут.

Численные значения параметров модели зависимости влажности проб растений от типа растений, зоны и времени наблюдения приведены в таблице 3. При подгонке параметров была использована логарифмическая шкала влажности растений. Все параметры модели статистически значимо отличались от нуля. При 40 наблюдениях и 36 степенях свободы скорректированный коэффициент детерминации был равен Adj. R²=0,49 при ошибке I рода $p=4,2e-06$. Ошибка модели в логарифмической шкале была равна $\varepsilon=0,11$, что соответствовало стандартному геометрическому отклонению $\sigma_g=1,12$.

Из таблицы 3 следует, что общий период полуубывания влажности в растениях составил $\frac{\ln(2)}{2,65e-3} \approx 262$ сут или 0,72 года при начальных значениях в диапазоне от ~74% до ~93% в зависимости от выбранного индекса зоны наблюдения и типа растений. Наибольшее начальное значение влажности проб растений наблюдалось в траве прибрежной зоны, наименьшее – на расстояниях от ~5 до 100 м в листьях берёзы.

Для оценки активности НТО, поступившего в воздух в поствегетационном периоде в 2021 г. с отмершими надземными частями растений, произрастающих вблизи озера Кызылташ, была создана модель прогнозирования ОА НТО ВВ растений. Учитывая наличие статистически значимой ранговой корреляции между ОА НТО ВВ растений и временем от начала вегетационного периода, а также отсутствие статистически значимого различия между

Таблица 3

Численные значения параметров модели влажности растений в зависимости от типа растений, зоны и времени наблюдения от начала вегетационного периода 2021 г.

[Table 3]

Parameter values of plant humidity models based on a type of plants, a zone and follow-up time from the beginning of the vegetation period of 2021]

Частные параметры $RH(0)_{ij}$ [Private parameters $RH(0)_{ij}$]			Общий параметр α , сут ⁻¹ [A common parameter α , day ⁻¹]
i-й	j-м		
		Лист берёзы, j=1 [A birch-tree leave, j=1]	Трава, j=2 [Grass, j=2]
i=1, Зона от 0 до 5 м от озера [i=1, A zone from 0 to 5 m from the lake]		$e^{4,389 \pm 0,063} \cong$ $\cong (80,6 \pm 5,1)\%$	$e^{4,527 \pm 0,072} \cong$ $\cong (92,5 \pm 6,7)\%$
i=2, Зона от 5 до 100 м от озера [i=2, A zone from 5 to 100 m from the lake]		$e^{4,305 \pm 0,075} \cong$ $\cong (74,1 \pm 5,5)\%$	$e^{4,443 \pm 0,083} \cong$ $\cong (85,0 \pm 7,0)\%$

медианами ОА НТО у 2 типов растений внутри обеих зон, была создана модель экспоненциального убывания с общей скоростью и частными начальными значениями объёмной активности:

$$VA(t)_i = VA(0)_i * e^{-\beta * t} \quad (5)$$

где:

$VA(t)_i$ – частное начальное значение ОА НТО ВВ растений в i-й зоне, Бк/л;

β – общая скорость убывания ОА НТО ВВ растений,

t – время наблюдения относительно 01.05.2021 г., сут.

Численные значения параметров модели зависимости ОА НТО ВВ растений от индекса зоны и времени наблюдения с начала вегетационного периода 2021 г. приведены в таблице 4. При подгонке параметров была использована логарифмическая шкала ОА НТО. Все параметры модели статистически значимо отличались от нуля. При 40 наблюдениях и 37 степенях свободы скорректированный коэффициент детерминации был равен Adj. $R^2=0,74$ при ошибке I рода $p=6,2e-12$. Ошибка модели в логарифмической шкале была равна $\varepsilon=0,60$, что соответствовало стандартному геометрическому отклонению $\sigma_g=1,81$.

Из таблицы 4 следует, что общий период полуубывания ОА НТО ВВ растений составил $\frac{\ln(2)}{1,08e-2} \cong 64$ сут или около 2 месяцев при начальном значении (на 01.05.2021 г.), равном 5860 Бк/л для береговой линии от 0 до ~5 м и 664 Бк/л для зоны от ~5 до 100 м. Таким образом, скорость убывания ОА НТО ВВ растений была приблизительно в $\frac{0,0108}{0,001378} \cong 8$ раз выше, чем общая скорость убывания ОА НТО в озере Кызылташ в том же периоде наблюдения [7]. Это, вероятно, было связано со значительным снижением и полной остановкой к концу вегетационного периода обменных процессов в растениях [9].

Для оценки уровня годового поступления трития в воздух в форме паров НТО от прибрежных растений

озера Кызылташ был произведён расчёт площади почвы на расстоянии до 100 м вокруг озера Кызылташ и площади крон деревьев, произрастающих на ней, с помощью спутниковых снимков высокого разрешения, предоставляемых сервисом Google Earth.

Результаты измерения площадей исследованных зон озера Кызылташ и площади крон деревьев, произрастающих на ней, приведены в таблице 5.

Из информации, представленной в таблице 5, следует, что площадь почвы зоны от 0 до ~5 м меньше, чем площадь зоны от ~5 до 100 м, в 5,1 раза, а площадь крон деревьев зоны от 0 до ~5 м меньше в 3,8 раза площади крон деревьев, растущих в зоне ~5 до 100 м. Общая площадь почвы исследованных зон озера Кызылташ была равна ~1,93 км², площадь крон деревьев, растущих на данной территории, равна ~1,41 км².

В таблице 6 приведены оценки поступления НТО в воздух из различных источников испарений, а также их вклад в суммарное годовое поступление, выраженный в процентах. Суммарное годовое поступление трития в воздух в 2021 г. от прибрежных растений составило 6,92E+11, или ~0,35% от годового поступления трития с поверхности озера Кызылташ [7].

Основной вклад в поступление трития в воздух от растений в форме паров НТО вносила транспирация растений 6,89E+11 Бк, т.е. 99,6% от годового поступления НТО от всех растений. Самое значительное поступление НТО в воздух производили растения береговой линии озера Кызылташ (0...~5 м) (81,8%). Несмотря на то, что площадь почвы зоны 0...~5 м меньше в 5,1 раза площади почвы зоны ~5...100 м, растения зоны 0...~5 м давали 81,8% от всего годового поступления трития от растений исследованных зон озера Кызылташ. Годовое поступление НТО только от растений береговой линии озера Кызылташ (0...~5 м), равное (5,66E+11 Бк), было сопоставимо с выбросами НТО в 2021 г. от Курской АЭС (5,32 E+11 Бк), а поступле-

Таблица 4

Численные значения параметров модели зависимости ОА НТО ВВ растений от индекса зоны и времени наблюдения с начала вегетационного периода 2021 г.

[Table 4]

Parameter values of a model of association between HTO VA of IW of plants and a zone index and follow-up time from the beginning of the vegetation period of 2021]

Частные параметры $VA(0)_i$, [Private parameters $VA(0)_i$]		
i=1 Зона от 0 до 5 м от озера [i=1 A zone from 0 to 5 m from the lake]	i=2 Зона от 5 до 100 м от озера [i=2 A zone from 5 to 100 m from the lake]	Общий параметр β =сут ⁻¹ [A common parameter, β =day ⁻¹]
$e^{8,676 \pm 0,327} \cong$ $\cong (5860 \pm 1920)$ Бк/л	$e^{6,496 \pm 0,392} \cong$ $\cong (664 \pm 260)$ Бк/л	-1,08e-2 ± 3,14e-3

Таблица 5

Площади почвы и крон деревьев исследованных зон озера Кызылташ, 10⁶ м² (или км²)

[Table 5]

Areas of the soil and the tree crowns of the studied zones of Lake Kyzyltash, 10⁶ m² (or km²)

Дата снимка [Date of a picture]	Площадь почвы зоны от 0 до ~5 м, (км ²) [Soil area of the zone from 0 to ~5 meters, (km ²)]	Площадь крон деревьев зоны от 0 до ~5 м, (км ²) [Tree crown area of the zone from 0 to ~5 meters, (km ²)]	Площадь почвы зоны ~5 до 100 м, (км ²) [Soil area of the zone from ~5 to 100 meters, (km ²)]	Площадь крон деревьев, растущих в зоне ~5 до 100 м, (км ²) [Tree crown area of the zone from ~5 to 100 meters, (km ²)]
12.06.2021 г.	0,316	0,293	1,618	1,116

Оценки поступления НТО в воздух из различных источников испарений и их вклад в суммарное годовое поступление

Таблица 6

[Table 6]

Estimates of HTO intake into the air from various sources of evaporation and their contribution to the total annual intake]

Период [Period]	Транспирация [Transpiration]				Поствегетационный период [Post-vegetation period]			
Зона, м [Zone, m]	0...~5		~5...100		0...~5		~5...100	
Источник испарений [Evaporation source]	Трава [Grass]	Листья [Leaves]	Трава [Grass]	Листья [Leaves]	Трава [Grass]	Листья [Leaves]	Трава [Grass]	Листья [Leaves]
Поступление трития в воздух, Бк [Tritium intake to the air, Bq]	4,32E+11	1,32E+11	6,79E+10	5,68E+10	1,52E+09	8,99E+07	8,08E+08	3,56E+07
Вклад в сумму, % [Contribution to the sum, %]	62,5	19,1	9,8	8,2	0,22	0,01	0,12	0,01
	81,6		18,0		0,23		0,12	
		99,6				0,4		

ние НТО от всех прибрежных растений озера Кызылташ – с выбросами Ленинградской АЭС (6,90E+11 Бк) [16].

Объёмная активность трития в воздухе вблизи озера Кызылташ

Результаты измерения ОА НТО в конденсате воздуха и расчётные значения ОА трития воздуха вблизи озера Кызылташ представлены в таблице 7.

Из информации, представленной в таблице 7, следует, что ОА НТО в воздухе у береговой линии и в 20 м в районе «Полигон» статистически значимо не отличались по медиане (парный тест Вилкокса, $W=5$, $p=0,5$), вероятно, вследствие малого количества параллельных проб. Средняя ОА НТО в воздухе в 100 м от береговой линии в районе Гаражи по 3 измерениям была на уровне 8,7 Бк/м³. Заслуживает внимания низкая ОА трития в воздухе проб, отобранных в ходе экспедиции 01.07.2021 г., которая была более чем на порядок величины меньше значения ОА трития проб воздуха, собранных в 2 других экспедициях, особенно это заметно для пробы с расстояния 20 м от берега. Это была единственная экспедиция накануне и во время кото-

рой шёл дождь. Наиболее вероятно, что воздушная масса с высоким содержанием влаги (относительная влажность воздуха 01.07.2021 г. составляла 65–71%), сформировавшаяся вдали от ПО «Маяк», принесла осадки в виде дождя, снизив ОА трития в воздухе вблизи самого озера Кызылташ.

Средняя ОА НТО в воздухе у береговой линии озера Кызылташ по 2 экспедициям в отсутствие осадков составляла ~60 Бк/м³, что в ~30 раз меньше допустимой ОА трития во вдыхаемом воздухе для населения, равной 1,9E+3 Бк/м³ согласно НРБ-99/2009⁵.

В случае гипотетического проживания на берегу озера Кызылташ в 2021 г. и постоянном уровне ОА трития в окружающей среде годовая ожидаемая эффективная доза (ОЭД) внутреннего облучения, обусловленная ингаляцией паров НТО, согласно НРБ-99/2009⁵, для стандартных условий составит $60 \text{ Бк/м}^3 \times 1900 \text{ м}^3/\text{год} \times 2,7 \cdot 10^{-10} \text{ Зв/Бк} \leq 31 \text{ мкЗв/год}$ для критической группы детей возраста 1–2 года и $60 \text{ Бк/м}^3 \times 8100 \text{ м}^3/\text{год} \times 1,8 \cdot 10^{-11} \text{ Зв/Бк} \leq 8,7 \text{ мкЗв/год}$ для взрослого населения. Данные оценки являются консервативными, так как не учитывают ледоставный период, в течение ко-

ОА НТО в конденсате воздуха и расчётные значения ОА НТО воздуха вблизи озера Кызылташ

Таблица 7

[Table 7]

HTO VA in air condensate and estimated values of HTO VA near Lake Kyzyltash]

Дата наблюдения [Follow-up date]	Зона наблюдения [Follow-up zone]					
	Береговая линия, полигон (номер 3 на рисунке 1) [Coastline, test site (no. 3 in Fig. 1)]		20 м от берега, полигон (номер 3 на рисунке 1) [20 meters from the lakeside, test site (no. 3 in Fig. 1)]		100 м от берега, гаражи (номер 2 на рисунке 1) [100 meters from the lake-side, garages (number 2 in Fig. 1)]	
	ОА НТО конденсата воздуха, Бк/л [HTO VA of the air condensate, Bq/l]	ОА НТО в воздухе, Бк/м ³ [HTO VA in the air, Bq/m ³]	ОА НТО конденсата воздуха, Бк/л [HTO VA of the air condensate, Bq/l]	ОА НТО в воздухе, Бк/м ³ [HTO VA in the air, Bq/m ³]	ОА НТО конденсата воздуха, Бк/л [HTO VA of the air condensate, Bq/l]	ОА НТО в воздухе, Бк/м ³ [HTO VA in the air, Bq/m ³]
17.06.2021 г.	5600	62,2	5060	58,2	1860	18,7
01.07.2021 г.	170	2,8	300	4,8	150	2,3
02.09.2021 г.	6650	62,1	6130	59,3	530	5,0

⁵ 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.)].

того испарение воды с поверхности озера Кызылташ и поступление из растений практически отсутствуют.

Заключение

Из анализа исходных данных и математического моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Исследованное пространство вокруг озера Кызылташ следует делить на 2 зоны: от 0 до ~5 м от береговой линии и ~5...100 м от неё, отличающиеся по уровню ОА НТО в растениях на порядок величины. Вероятной причиной различия являлось интенсивное поглощение корневой системой растений береговой линии воды из озера Кызылташ.

2. Наблюдаемые обратные ранговые корреляции ОА НТО в пробах растений носили характер от слабой (со временем от начала вегетационного периода) до заметной (с расстоянием до берега озера Кызылташ). Модельная оценка общего периода полужизни ОА НТО ВВ растений в течение их вегетации составила около 2 месяцев (64 сут).

3. Обратная ранговая корреляция влажности проб растений и времени от начала вегетационного периода была умеренной. Влажность в траве была больше, чем в листьях берёзы, по медианному значению в 1,15 раза (~71% против ~62%). Общий период полужизни влажности в растениях составил около 9 месяцев (262 сут).

4. Построенные по исходным данным модели позволили оценить ОА НТО ВВ и влажность в растениях в конце вегетационного периода и оценить поступление трития в воздух в поствегетационном периоде.

5. Оценка общего поступления НТО в воздух от прибрежных растений в 2021 г. была равна ~0,7 ТБк, что составляло ~0,35% от поступления трития с поверхности озера Кызылташ за счёт испарения. Подавляющий вклад (99,6%) в поступление от растений внёс процесс транспирации в течение вегетационного периода. Растения береговой линии 0...~5 м, несмотря на меньшую в 5,1 раза площадь почвы, внесли в ~ 4,5 раза больший вклад (81,8%) в сравнении с зоной ~5...100 м (18,1%) в итоговое поступление НТО в окружающую среду. Вклад отмершей травы и листьев берёзы в итоговое поступление НТО в поствегетационном периоде составил всего 0,4%.

6. Оценка ОА НТО в воздухе у береговой линии озера Кызылташ по 2 экспедициям в отсутствие осадков составляла ~60 Бк/м³, что было в ~30 раз меньше допустимой ОА трития во вдыхаемом воздухе для населения, равной 1,9Е+3 Бк/м³ согласно НРБ-99/2009. Таким образом, нахождение у берега озера Кызылташ являлось безопасным с точки зрения внутреннего облучения от трития.

7. Резкое изменение ОА НТО ВВ растений между зонами 0...~5 м от берега озера Кызылташ и остальной зоной ~5...100 м на порядок величины, а также сравнительно слабое изменение ОА трития в воздухе между берегом и на расстоянии ~20 м (~10%) подтвердило факт о превосходящем поступлении воды в растения из почвы через корневую систему над абсорбцией паров воды листьями из воздуха.

8. В случае гипотетического проживания на берегу озера Кызылташ в 2021 г. и постоянном уровне ОА трития в объектах окружающей среды консервативные оценки годовых ОЭД внутреннего облучения, обусловленных ингаляцией паров НТО, для стандартных условий соста-

вят 31 мкЗв/год для критической группы детей возраста 1–2 года и 8,7 мкЗв/год для взрослого населения.

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.

Финашов Л.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.

Благодарности

Авторы благодарят сотрудников Южно-Уральского регионального аварийного медико-дозиметрического центра (ЮУРАМДЦ) А.И. Алдошина и В.А. Марова за техническое обеспечение по перевозке отобранных проб и дозиметрический контроль.

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

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование

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

Литература

1. Калистратова В.С., Беляев И.К., Жорова Е.С., и др. Радиобиология инкорпорированных радионуклидов. Под ред. В.С. Калистратовой. М.: ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2012. 464 с. URL: <http://ecoradmod.narod.ru/rus/publication2/RNMonografiya.pdf> (Дата обращения: 03.03.2023).
2. Барчуков В.Г., Кочетков О.А., Клочков В.Н., и др. Распространение трития и его соединений в окружающей среде при нормальных условиях эксплуатации Калининской АЭС // Медицина труда и промышленная экология. 2021. Т. 61, № 9. С. 594–600. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2021-61-9-594-600>.
3. Янов А.Ю., Востротин В.В., Финашов Л.В. Тритий в окружающей среде Уральского региона: обзор современного состояния и анализ перспектив изучения с позиций радиологической защиты // Человек. Спорт. Медицина. 2016. Т. 16, № 2. С. 85–99. DOI: 10.14529/hsm160209.

4. Mohamed Abdou, Marco Riva, Alice Ying, et al. Physics and technology considerations for the deuterium-tritium fuel cycle and conditions for tritium fuel self sufficiency // Nuclear Fusion. 2021. Vol. 61, № 1. P. 51. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/abfb35>.
5. Baojie Nie, Siyuan Wu, Derui Yang, et al. Quantitative prediction of dynamic HTO migration behavior in the soil and non-negligible evapotranspiration effect // Journal of Hazardous Materials. 2021. Vol. 425, № 127772. P. 9. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127772> (Дата обращения: 03.04.2023 г.).
6. Поливкина Е.Н., Ларионова Н.В., Ляхова О.Н. Оценка аэраляного поглощения НТО культурой Helianthus Annuus в условиях Семипалатинского испытательного полигона // Радиация и риск. 2020. Т. 29, № 1. С. 79-89. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2020-29-1-79-89>.
7. 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. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-4-88-96>.
8. Чеботина М.Я., Николин О.А., Смагин А.И., Мурашова Е.Л. Тритий в водоемах производственного и комплексного назначения в районе по «Маяк» на Урале // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2011. № 4. С. 75-84.
9. Лебедев С.И. Физиология растений. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1988. 543 с.
10. Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений. Всемирная Метеорологическая Организация, 2008: ВМО-№ 8, 2014. 788 с.
11. Нормативно-производственный регламент содержания зеленых насаждений, утвержденный Приказом Госстроя России от 10 декабря 1999 г. № 145. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=49758> (Дата обращения: 03.04.2023 г.).
12. Земсков Ф.И., Галкин В.С., Анохина Н.А., и др. Методические особенности исследования динамики поступления опада в условиях стационарных почвенных лизиметров // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение, 2017. № 1. С. 9-15. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodicheskie-osobennosti-issledovaniya-dinamiki-postupleniya-opada-v-usloviyah-statsionarnyh-pochvennyh-lizimetrov> (Дата обращения: 03.04.2023 г.).
13. Grabovsky V.I., Zukert N.V., Korzukhin M.D. Estimates of leaf-area index for the territory of Russia using State Forest Inventory data // Contemporary Problems of Ecology. 2016. Vol. 9, № 7. P. 814-819. <https://doi.org/10.1134/S1995425516070064>.
14. Гончарова Э.А., Удовенко Г.В., Нечипоренко Г.А., Жолкевич В.Н. Изучение водообмена плодов кабачка с помощью тритиевой метки // Физиология растений. 1984. Т. 31, № 5. С. 841-846.
15. Грибачева О.В., Сотников Д.В., Черская Н.А., и др. Листоной опад в полезащитных лесных полосах Луганщины // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В.Р. Филиппова. 2022. Т. 66, № 1. С. 68-75. DOI: 10.34655/bgsha.2022.66.1.009.
16. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2021 г. Ежегодник. Обнинск, 2022. 342 с.

Поступила: 11.04.2023 г.

Востротин Вадим Владимирович – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией, старший научный сотрудник лаборатории радиационной безопасности, Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства. **Адрес для переписки:** 456783, Россия, Челябинская область, г. Озёрск, Озёрское шоссе, д. 19; E-mail: vostrotin@subi.su

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3999-5223>

Финашов Леонид Викторович – научный сотрудник лаборатории радиационной безопасности, Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озёрск, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2261-6589>

Для цитирования: Востротин В.В., Финашов Л.В. Оценка поступления трития в воздух от прибрежных растений озера Кызылташ в 2021 г. // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 2. С. 78-90. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-78-90

Estimate of Tritium Intake in the Air from Coastal Plants of Lake Kyzyltash in 2021

Vadim V. Vostrotin, Leonid V. Finashov

South Ural Institute of Biophysics, Ozersk, Chelyabinsk region, Russia

The goal of the research was determination of the level of annual tritium intake in the air from coastal plants of Lake Kyzyltash in 2021 and compliance of tritium content in the air of the coastal area of Lake Kyzyltash in 2021 with radiation safety standards. In the period May-September, 2021, a study of coastal plants near Lake Kyzyltash, a technological reservoir of the Mayak Production Association, was conducted. Within 100 m from the lakeside, humidity level of plants ranged from 41% to 87%, tritium volume activity level in the water of plants and transpiration water varied from 96 Bq/l to ~8.0 kBq/l and from 64 Bq/l to ~9.0 kBq/l, correspondingly. Based on the Cheddock scale, rank correlations between tritium volume activity and: time from the beginning of a vegetation period (weak reverse); distance from the lakeside (marked reverse); humidity of the plants (moderate positive), were revealed. To predict tritium intake in the air in the form HTO during the post-vegetative period, exponential decrease models of humidity and tritium volume activity in the plants with time were developed. The estimates of general periods of semi-decrease in humidity and tritium volume activity in the water of the plants, were 262 and 64 days, correspondingly. Total annual HTO intake in the air in 2021 from coastal plants was $6.92 \text{ E}+11 \text{ Bq}$, with contribution 0.35% of annual tritium intake from Lake Kyzyltash surface. The plants from the zone 0...~5m contribute 81.8% of total annual intake from coastal plants of Kyzyltash Lake ($5.66 \text{ E}+11 \text{ Bq}$). Annual HTO intake from the plants of Lake Kyzyltash coastline (0...~5m) only, was $5.66 \text{ E}+11 \text{ Bq}$ and was consistent with tritium release in 2021 from the Kursk Nuclear Power Plant ($5.32 \text{ E}+11 \text{ Bq}$), and tritium intake from all coastal plants of Lake Kyzyltash – with release from the Leningrad Nuclear Power Plant ($6.90 \text{ E}+11 \text{ Bq}$). In the course of two expeditions, if there were no precipitations, the mean HTO volume activity in the air of Lake Kyzyltash coastal areas was ~60 Bq/m³, which is ~30 times less than permissible volume activity in the inhaled air for population $1.9 \text{ E}+3 \text{ Bq/m}^3$, according to NRB-99/2009. In the case of a hypothetical residence on the lakeside of Lake Kyzyltash in 2021 and a permanent level of tritium volume activity in natural environments, an annual committed effective dose of internal radiation conditioned by inhalation of super-heavy water vapor, will be 31 μSv/year for a critical group of children aged 1-2 years and 8.7 μSv/year for adult residents, according to NRB-99/2009. These estimates are conservative as far as they do not take into account the ice-free period during which there is practically no evaporation of water from Lake Kyzyltash surface and intake from plants.

Key words: tritium, plants, coastline, transpiration, air, Lake Kyzyltash, Mayak Production Association.

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; collection, analysis and interpretation of the data;
- writing and editing the article 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.

Finashov L.V.:

- significant contribution to the development of the research concept; collection, analysis and interpretation of the data;
- writing and editing the article 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.

Acknowledgements

The authors thank the colleagues from the Southern Urals Regional Emergency Medical Dosimetric Center (SUREMDC) Aidoshin A.I. and Marov V.A. for technical support for the transportation of selected samples and dosimetric control.

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

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest in the performance of the work and preparation of this article.

Funding

The work was carried out within the framework of the State Program of the Russian Federation “Health development”

Vadim V. Vostrotin

South Ural Institute of Biophysics

Address for correspondence: 456783, Russia, Chelyabinsk region, Ozyorsk, Ozyorskoe shosse, 19; E-mail: vostrotin@subi.su

under the contract no. 11.301.21.0 a codename "Kyzyltash-21" funded by the FMBA of Russia.

References

1. Kalistratova VS, Belyaev IK, Zhorova ES, Nisimov PG, Parfenova IM, Tishchenko GS, et al. Radiobiology of incorporated radionuclides. Edited by Kalistratova V.S. Publisher Burnasyan FMBC of the FMBA of Russia; 2012. 464 p. (In Russian). Available from: <http://ecoradmod.narod.ru/rus/publication2/RNMonografiya.pdf> (Accessed: 03.03.2023).
2. Barchukov VG, Kochetkov OA, Klochkov VN, Eremina NA, Maksimov AA. Distribution of tritium and its compounds in the environment under normal conditions of operating of Kalininskaya nuclear power plant. *Meditina truda i promyshlennaya ekologiya = Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2021;61(9): 594-600. (In Russian). Available from: <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2021-61-9-594-600> (Accessed: 03.03.2023).
3. Yanov AY, Vostrotin VV, Finashov LV. Environmental Tritium in the Ural Region: Current Situation and Radiation Protection Analysis of Research Perspectives. *Chelovek. Sport. Meditsina = Human. Sport. Medicine*. 2016;16(2): 85-99. (In Russian). Available from: DOI: 10.14529/hsm160209 (Accessed: 03.03.2023).
4. Mohamed Abdou, Marco Riva, Alice Ying, Christian Day, Alberto Loarte, Baylor LR, et al. Physics and technology considerations for the deuterium-tritium fuel cycle and conditions for tritium fuel self sufficiency. *Nuclear Fusion*. 2021;61(1): 51. Available from: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/abbf35> (Accessed: 03.03.2023).
5. Baojie Nie, Siyuan Wu, Derui Yang, Deyi Chen, Weiguo Gu, Wentao Zhou, et al. Quantitative prediction of dynamic HTO migration behavior in the soil and non-negligible evapotranspiration effect. *Journal of Hazardous Materials*. 2022;425: 127772. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127772>. (Accessed: 03.03.2023).
6. Polivkina EN, Larionova NV, Lyakhova ON. Evaluation of the aerial uptake of HTO by Helianthus Annuus culture under the conditions of the Semipalatinsk test site. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2020;29(1): 79-89. (In Russian). Available from: <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2020-29-1-79-89> (Accessed: 03.03.2023).
7. Vostrotin V.V., Yanov A.Yu. Estimation of the level of annual tritium entry into the air from the surface of the Kyzyltash lake. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(4):88-96. (In Russian). Available from: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-4-88-96> (Accessed: 03.03.2023).
8. Chebotina MYu, 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).
9. Lebedev SI. Plant physiology. 3rd ed., revised. and additional. Moscow: Agropromizdat; 1988. 543 p. (In Russian).
10. Guide to meteorological instruments and observation methods. World Meteorological Organization, 2008: WMO-No. 8; 2014. 788 p. (In Russian).
11. Regulatory and production regulations for the maintenance of green spaces approved by order of the State Committee for Construction of Russia of December 10; 1999, No. 145 (In Russian).
12. Zemskov FI, Galkin VS, Anokhina NA, Bogatyrev LG, Demidova AN, Prilepsky NG, et al. Methodological features of the studies of the dynamics of the receipt of litter in conditions of stationary soil tanks. *Vestnik Moskovskogo universiteta = Bulletin of the Moscow University*. Series 17. Soil science. 2017;1: 9-15. (In Russian). Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodicheskie-osobennosti-issledovaniya-dinamiki-postupleniya-opada-v-usloviyah-statsionarnyh-pochvennyh-lizimetrov> (Accessed: 03.03.2023).
13. Grabovsky VI, Zukert NV, Korzukhin MD. Estimates of leaf-area index for the territory of Russia using State Forest Inventory data. *Contemporary Problems of Ecology*. 2016;9(7): 814-819. Available from: <https://doi.org/10.1134/S1995425516070064> (Accessed: 03.03.2023).
14. Goncharova EA, Udovenko GV, Nechiporenko GA, Zholkevich VN. Study of water exchange of courgette fruits using a tritium label. *Fiziologiya rasteniy = Plant Physiology*. 1984;31(5): 841-846. (In Russian).
15. Gribacheva OV, Sotnikov DV, Cherskaya NA, Karmazina AV, Kravets AL. Leaf litter in the field-protective forest belts of the Luhansk region. *Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii imeni V.R. Filippova = Bulletin of the Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov*. 2022;66(1): 68-75. (In Russian). Available from: DOI: 10.34655/bgsha.2022.66.1.009 (Accessed: 03.03.2023).
16. Radiation situation on the territory of Russia and neighboring states in 2021. *Annals*. Obninsk 2022; 342 p. (In Russian).

Received: April 11, 2023

For correspondence: Vadim V. Vostrotin – Candidate of Biology Sciences, Head of laboratory of radiation safety, Senior Researcher, Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency (Ozyorskoe shosse, 19, Ozyorsk, Chelyabinsk region, 456783, Russia; E-mail: vostrotin@subi.su)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3999-5223>

Leonid V. Finashov – Research Assistant laboratory radiation safety, Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency, Ozyorsk, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2261-6589>

For citation: Vostrotin V.V., Finashov L.V. Estimate of Tritium Intake in the Air from Coastal Plants of Lake Kyzyltash in 2021. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 2. P. 78-90 (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-78-90