

DETERMINATION OF TRITIUM IN VEGETATION IN THE OBSERVATION AREA OF REACTOR WWR-K IN KAZAKHSTAN

M.V. Krasnopyorova*, M.A. Severinenko, P.V. Kharkin, O.S. Milts,
V.A. Makarova, Zh.K. Sanalbay

RSE on REM "Institute of Nuclear Physics" of ME RK, Almaty, Kazakhstan

*E-mail: marina.k@inp.kz

Abstract. *Introduction.* In assessing the impact of radiation-hazardous facilities on the environment and humans, considerable attention is currently paid to the problem of tritium and its compounds intake. It is important to note that to date there are no effective industrial technologies for efficient capture of this radionuclide. As a result, all the tritium produced during the operation of nuclear power plants with emissions and discharges is released into the environment. This leads to increased tritium concentrations in the environment, including vegetation. *The aim of this work* is to develop and adapt a set of methods for sample preparation and determination of tritium in vegetation samples. *Methodology:* A special Carbolite Gero MTT tube furnace was used to improve sample preparation methods and maximise the recovery of organically bound tritium from vegetation. Tritium was measured by liquid scintillation beta spectrometry. *Results and Discussion:* This research paper presents the results of the study and implementation of the method of tritium determination in vegetation near the VVR-K reactor located in the city of Almaty, Kazakhstan. *Conclusions:* The developed method of tritium determination in vegetation can be applied for radiation monitoring of tritium content and its compounds in the vicinity of nuclear industrial facilities. The presented data emphasise the need for systematic studies of tritium accumulation in environmental components. It is expected that in the future, using the implemented method, the studied area will be studied in detail, taking into account an extended set of factors: meteorological conditions, reactor operation mode and others. Thus, for a more complete and reliable assessment of tritium radionuclide activity determination, it is necessary to carry out works to determine the type of vegetation accumulating this isotope.

Key words: radioecology; vegetation; tritium; specific activity; WWR-K type reactor

Krasnopyorova Marina Vladimirovna *PhD. E-mail: marina.k@inp.kz*

Severinenko Maria Anatolievna *Master. E-mail: m.severinenko@inp.kz*

Kharkin Pavel Viktorovich *Head of Laboratory. E-mail: kharkin@inp.kz*

Milts Olga Sergeevna *Master. E-mail: o.milc@inp.kz*

Citation: Krasnopyorova M.V., Severinenko M.A., Kharkin P.V., Milts O.S., Makarova V.A., Sanalbay Zh.K. Determination of tritium in vegetation in the observation area of reactor WWR-K in Kazakhstan. *Chem. J. Kaz.*, **2023**, 3(83), 70-80. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51580/2023-3.2710-1185.28>

<i>Makarova Varvara Aleksandrovna</i>	<i>Master, e-mail: varvara@inp.kz</i>
---------------------------------------	---------------------------------------

<i>Sanalbay Zhanar Kairatkyzy</i>	<i>Master, e-mail: zh.sanalbay@inp.kz</i>
-----------------------------------	---

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРИТИЯ В РАСТИТЕЛЬНОСТИ В ЗОНЕ НАБЛЮДЕНИЯ РЕАКТОРА ВВР-К В КАЗАХСТАНЕ

М.В. Красножёрва^{}, М.А. Севериненко, П.В. Харкин, О.С. Мильц, В.А. Макарова*

Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

**E-mail: marina.k@inp.kz*

Резюме. *Введение.* При оценке воздействия радиационно-опасных объектов на окружающую среду и человека в настоящее время уделяется значительное внимание проблеме поступления трития и его соединений. Важно отметить, что до настоящего времени не существует эффективных промышленных технологий для эффективного захвата этого радионуклида. В результате, весь тритий, образующийся при работе атомных энергетических установок с выбросами и сбросами, попадает в окружающую среду. Это приводит к увеличению концентрации трития в окружающей среде, включая растительность. *Целью данной работы* является разработка и адаптация комплекса методов пробоподготовки и определения трития в пробах растительности. *Методология:* Для улучшения методов подготовки проб и максимального извлечения органически связанного трития из растительности использовалась специальная трубчатая печь Carbolite Gero МТТ. Измерение трития проводили методом жидкосцинтилляционной бета-спектрометрии. *Результаты и обсуждение:* В данной исследовательской работе представлены результаты исследования и внедрения метода определения трития в растительности вблизи реактора ВВР-К, расположенного в городе Алматы, Казахстан. *Выводы:* Разработанный метод определения трития в растительности может быть применен для проведения радиационного контроля содержания трития и его соединений в окрестностях атомных промышленных объектов. Представленные данные подчеркивают необходимость системных исследований по изучению накопления трития в компонентах окружающей среды.

Ключевые слова: радиозекология, растительность, тритий, удельная активность, реактор типа ВВР-К

<i>Красножёрва Марина Владимировна</i>	<i>PhD</i>
--	------------

<i>Севериненко Мария Анатольевна</i>	<i>магистр</i>
--------------------------------------	----------------

<i>Харкин Павел Викторович</i>	<i>заведующий лабораторией</i>
--------------------------------	--------------------------------

<i>Мильц Ольга Сергеевна</i>	<i>магистр</i>
------------------------------	----------------

<i>Макарова Варвара Александровна</i>	<i>магистр</i>
---------------------------------------	----------------

<i>Саналбай Жанар Кайраткызы</i>	<i>магистр</i>
----------------------------------	----------------

1. Введение

В вопросах обеспечения радиационной безопасности ядерных установок, контроль содержания трития занимает особое место. В объеме газообразных выбросов в окружающую среду тритий занимает второе место после инертных радиоактивных газов. Но, в отличие от них, тритий, во-

первых, характеризуется более длительным периодом полураспада (12,6 лет), во-вторых обладает свойством эффективно включаться в состав биологической ткани, вызывая нарушения биомолекулярных связей в организме, и в-третьих, оказывать дозовую нагрузку на население за счет испускаемого β -излучения. По данным [1], почти 2/3 внутренней дозы приходится на поступление трития.

Необходимо отметить, что в настоящее время отсутствуют приемлемые промышленные технологии для эффективного улавливания трития [2], что приводит к его выбросам и сбросам в окружающую среду. В результате этого процесса, тритий, образующийся при работе атомных энергетических установок, накапливается в окружающей среде. Значимость проблемы трития при использовании атомных технологий описана в техническом отчете МАГАТЭ [3], в котором особое внимание уделяется сложности обнаружения и анализа содержания трития в различных средах. Все вышеназванные факторы демонстрируют необходимость проведения мониторинга и определения трития в окружающей среде в районе расположения источника его поступления, в частности от ядерных установок.

Эта тема имеет важное значение для Казахстана. Являясь лидером по добыче и производству урана в мире, решая вопросы расширения энергетического сектора, Казахстан становится на путь развития атомной энергетики. Поэтому для Казахстана актуальными являются исследования по разработке современных аналитических методик определения радионуклидного состава различных объектов окружающей среды для их дальнейшего использования с целью оценки влияния на окружающую среду объектов ядерной энергетики. Особую важность имеют высокочувствительные измерения концентраций трития в окружающей среде в зоне расположения радиационного объекта, с пределом обнаружения трития на уровне его естественной распространенности.

В рамках радиационного мониторинга в районе расположения реактора ВВР-К в г. Алматы при поддержке государственных научно-технических программ, Институт ядерной физики проводит исследования и внедрение новых методов обнаружения радионуклидов в окружающей среде. До настоящего времени радиационный мониторинг традиционно был ориентирован на контроль радионуклидов, которые были специфическими для непредусмотренных выбросов ядерных установок, а также радионуклидов - индикаторов нарушений в работе ядерных реакторов. В то же время накопленный мировой опыт эксплуатации ядерных установок убедительно доказывает [4], что при нормальной работе реактора указанные радионуклиды практически не поступают в окружающую среду. Это возможно только в аварийных ситуациях. В штатном же режиме работы большая часть дозовых нагрузок обусловлена не тяжелыми долгоживущими радионуклидами, а газами, такими как тритий и радиоуглерод.

В данной работе приводятся результаты исследования и внедрения метода определения трития в растительности в районе расположения реактора ВВР-К. Актуальность исследования вызвана тем, что при изучении поведения соединений трития в атмосфере и водных объектах достигнут значительный прогресс, однако на сегодняшний день известно недостаточно о его взаимодействии с растительностью. Одним из известных методов, используемых для извлечения трития из растительности, является метод вываривания [5]. Этот метод основан на принципе измерения растворимых в воде органических соединений трития, включая НТО. Определение трития в данном случае основано на превращении этого нуклида в растворенное состояние путем кипячения 1 кг растений в скороварке с использованием 1 литра фоновой воды.

Несмотря на свою видимую простоту, данный метод обладает рядом недостатков. Особенно следует отметить его требование к большим временным затратам для исследования и наличию больших объемов анализируемого материала. Однако самым существенным недостатком является то, что в процессе экстракции в воду переходят только растворимые органические соединения трития, в то время как соединения, встроенные в структуру мембран или органелл клетки, не извлекаются. В результате эти соединения не попадают в анализируемую пробу, что приводит к неполному учету трития. Если в образце присутствует значительное количество таких соединений, погрешность получаемых результатов становится значительной.

В настоящее время метод подготовки счётного образца путем сжигания выборочной пробы в специальном устройстве приобрел широкую популярность [6-7]. Одним из несомненных преимуществ данного метода является малый объем исследуемой пробы, относительно быстрый процесс получения материала для счётного образца и, что наиболее существенно, окисление всех соединений трития в пробе до тритиевого оксида. Таким образом, данный метод позволяет определить полное содержание трития в пробе с относительно низкой погрешностью получаемых результатов.

Для разработки методики оценки содержания трития в растительности мы выбрали второй вариант пробоподготовки, поскольку он наиболее точно позволяет определить содержание соединений трития в исследуемых образцах.

Экспериментальная часть

Объектом исследования является растительность, произрастающая на в зоне наблюдения реактора ВВР-К. Всего было отобрано 10 проб растительности (рис. 1) на территории предприятия (SP-1, SP-2, SP-3, SP-4, SP-8), на территории санитарной зоны (SP-5, SP-7, SP-9), а также на фоновой точке (SP-10), расположенной в 30 км от реактора. Поскольку основной целью являлась отработка методики пробоподготовки и

аналитических исследований, тип растительности не учитывался. Отбор проб проводился весной и осенью 2022 года.

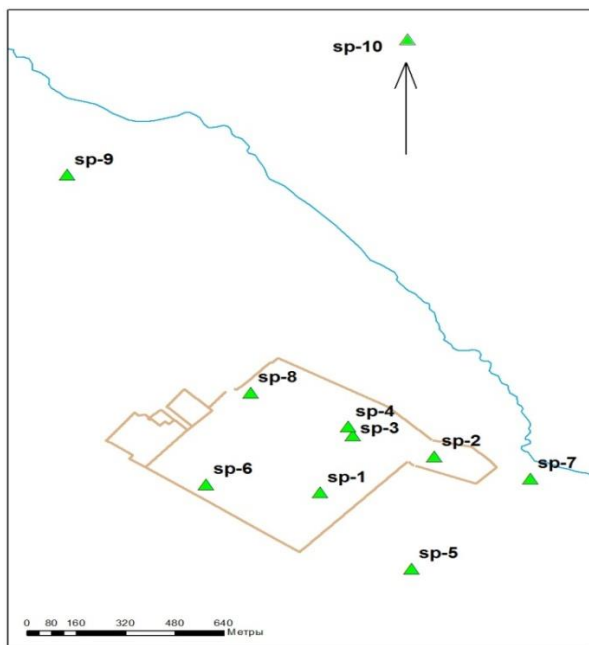


Рисунок 1 – Карта-схема точек отбора проб растительности на территории ИЯФ

Отбор проб растений для определения концентрации трития на участках исследования проводился методом «укосов». При этом травянистые растения срезались на высоте 1-3 см, крупнотравье – 4-6 см. Высушенные фрагменты растения удалялись, очищенные от посторонних предметов пробы помещались в полиэтиленовые пакеты. Отобранные пробы помещали в кулер-холодильник для предотвращения потерь влаги. Процесс отбора проб и пробоподготовки представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Фото отбора проб растительности и последующей пробоподготовки

В качестве усовершенствования методов прободготовки и для наилучшего извлечения органически связанного трития из растительности использована трубчатая печь специального назначения для выделения трития Carbolite Gero MTT 12/38/850 [8] с выходной мощностью 3100 Вт, обеспечивающая максимальную температуру 1200°C.

Принцип работы печи заключается в том, что пробы помещаются в лодочки из кварцевого стекла, которые затем перемещаются внутри кварцевой трубки в центр зоны подачи пробы. На трубку устанавливается заглушка из боросиликатного стекла, а к противоположному концу трубки зоны каталитического разложения присоединяется одна или две барботерные ловушки с 20 мл 0.1 М раствора HNO_3 . Воздух пропускается через пробу, которая постепенно нагревается до максимальной температуры в соответствии с запрограммированным профилем нагрева. В зоне каталитического разложения продукты сгорания пробы пропускаются через медный катализатор, нагретым до 800°C, при этом все ионы трития окисляются до оксида трития, который осаждается в ловушках с азотной кислотой.

Объем собранной воды на выходе составил 10-11 мл в зависимости от влажности изначальной пробы. Для каждой пробы растительности параллельно определялась относительная влажность для дальнейших расчетов.

Из полученных в ловушках растворов готовят счётные образцы, которые измеряют на жидкостном сцинтилляционном счётчике Tri Carb 2900 TR, предназначенном для измерения альфа- и бета-излучателей природного и техногенного происхождения в окружающей среде и в промышленных образцах, после чего рассчитывают активность трития на 1 кг растительности.

Подготовленные счётные образцы выдерживали в тёмном месте в течение 12 часов для гашения фотолюминесценции, вызванной манипуляциями с пробой. Через 12 часов подготовленные счётные образцы измеряли на жидкосцинтилляционном счётчике Tri-Carb 2900 TR в соответствии с руководством пользователя [9].

Измерение скорости счета бета-частиц трития в смесях выполнено в течение 180 минут в энергетическом окне между шумовым порогом детектора и максимальной энергией бета-частиц трития (18.6 кэВ) с относительной эффективностью регистрации для выбранного диапазона измерений не менее 60%.

Результат измерения удельной активности трития в растительной пробе, X , Бк/г, на дату измерения, полагая плотность собранной водной пробы $\approx 1 \text{ г/см}^3$ и не значимую разницу в объемных активностях трития в исходной и в перегнанной водной пробе, вычисляют по формуле:

$$x = \frac{A \cdot k_p \cdot M}{k \cdot m \cdot 1000}, \quad (1)$$

где A – объемная активность водной пробы для бета-счета, Бк/дм³;

k_p – коэффициент разбавления при приготовлении пробы для бета-счета, по умолчанию $k_p=1$;

M – масса собранной водной пробы после сжигания растительной пробы, г;

k – поправочный коэффициент, учитывающий гашение при использовании метода внутреннего стандарта,

m – навеска растительной пробы, взятая на анализ, г.

Оценка метрологических параметров методики определения трития проведена с использованием жидкосцинтиляционной спектрометрии, включая статистическую обработку получаемых данных.

В качестве образца для оценки метрологических показателей запланировано использовать сертифицированный стандартный образец водно-связанного трития SRM4927F [10], аттестованное значение трития 1269,4 Бк/мл.

В результате внедрения метода проведена оценка следующих метрологических показателей:

- оценка среднего квадратичного отклонения, характеризующего повторяемость результатов единичных измерений активности трития в SRM4927F и показатель повторяемости;

- среднее квадратичное отклонение, характеризующее промежуточную прецизионность результатов измерения активности трития и показатель промежуточной прецизионности;

- оценка значения смещения результатов измерения активности трития в стандартном образце и ее значимость на фоне случайного разброса;

- оценка СКО не исключенной систематической погрешности;

- оценка показателя точности, который соответствует расширенной неопределенности с коэффициентом охвата $k=2$.

Результаты и обсуждение

Результаты определения трития в растительности представлены в таблице 1. Распределение уровней удельной активности трития между точками отбора проб представлено на рисунке 3.

Таблица 1 – Определение трития в растительности в зависимости от сезона

Точки отбора	Активность трития, Н-3, Бк/л (весна)	Активность трития, Н-3, Бк/л (осень)
SP-1	11.8±1.3	13.6±1.3
SP-2	13.8±1.5	15.6±1.3
SP-3	19.5±1.8	23.9±2.0
SP-4	18.1±1.7	19.4±1.8
SP-5	24.6±2.0	23.0±2.0
SP-6	20.2±2.0	13.8±1.2
SP-7	26.9±2.2	28.8±2.6
SP-8	20.3±2.0	24.7±2.2
SP-9	25.9±2.6	25.7±2.4
SP-10	14.2±1.3	14.9±1.3

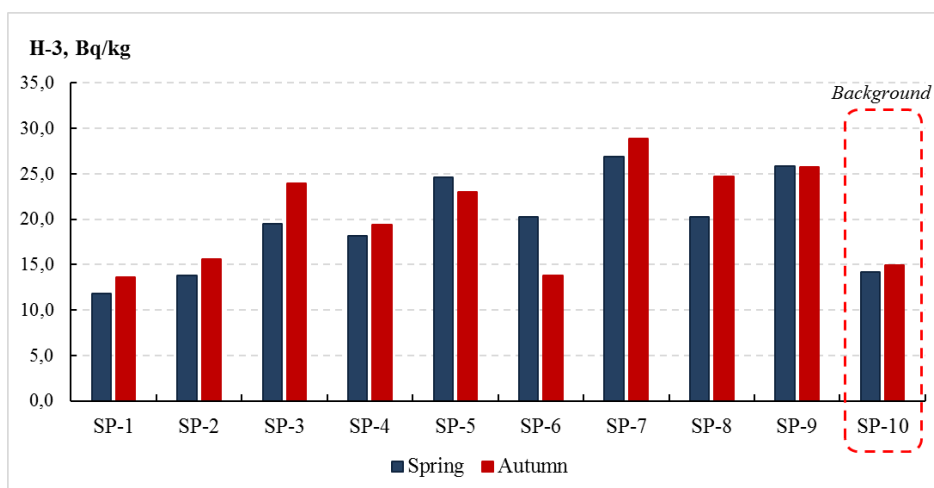


Рисунок 3 - Распределение значений удельной активности трития в растительности в точках отбора проб

Как видно из полученных данных диапазон активности трития в растительности в точках отбора проб, составляет 11.8-26.9 Бк/кг весной и 13.6-28.8 Бк/кг осенью, по сравнению с фоновым значением 14.2 Бк/кг 14.9 Бк/кг весной и осенью соответственно. В целом, зафиксированные значения удельной активности соответствуют фону и не представляют угрозы для окружающей среды и населения. Однако это утверждение носит предположительный характер и требует более детального исследования.

Разработанная методика определения трития в растительности может быть использована для проведения радиационного контроля содержания трития и его соединений в окрестностях объектов атомной промышленности.

Ожидается, что в будущем, с использованием внедрённого метода, будет детально изучена исследуемая площадь с учетом расширенного набора факторов: метеорологические условия, режим работы реактора и другое.

Таким образом, для более полной и достоверной оценки определения активности радионуклида трития необходимо провести работы по определению вида растительности, аккумулирующих данный изотоп.

Финансирование: Данные исследования финансировались Министерством энергетики Республики Казахстан в рамках научно-технической программы «BR09158958 «Развитие ядерно-физических методов и технологий для инновационной модернизации экономики Казахстана».

Конфликт интересов: Отсутствует конфликт интересов между авторами.

ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ ВВР-К РЕАКТОРЫНЫҢ БАҚЫЛАУ АЙМАҒЫНДАҒЫ ӨСІМДІКТЕРДЕГІ ТРИТИЙДІ АНЫҚТАУ

М.В. Краснопёрова, М.А. Севериненко, П.В. Харкин, О.С. Мильи, В.А. Макарова, Ж.К. Саналбай*

РМК Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

**E-mail: marina.k@inp.kz*

Түйіндемe. *Kіріспе.* Радиациялық қауіпті объектілердің қоршаған ортаға және адамға әсерін бағалау кезінде қазіргі уақытта тритий мен оның қосылыстарының ену проблемасына көп көңіл бөлінеді. Маңыздысы, осы уақытқа дейін бұл радионуклидті тиімді ұстаудың тиімді өндірістік технологиялары жоқ. Нәтижесінде шығарындылары мен төгінділері бар атом энергетикалық қондырғылары жұмыс істеген кезде пайда болатын барлық тритий қоршаған ортаға түседі. Бұл қоршаған ортадағы, соның ішінде өсімдіктердегі тритий концентрациясының жоғарылауына әкеледі. *Бұл жұмыстың мақсаты* өсімдік сынамаларында тритийді анықтау және сынама дайындау әдістерінің кешенін әзірлеу және бейімдеу болып табылады. *Әдістеме:* Сынамаларды дайындау әдістерін жақсарту және өсімдіктерден органикалық байланысқан тритийді максималды алу үшін арнайы CarboliteGeroMTT құбырлы пеші пайдаланылды. Тритийді өлшеу сұйық сцинтилляциялық бета-спектрометрия әдісімен жүргізілді. *Нәтижелер мен пікірталас:* Осы зерттеу жұмысында Қазақстан, Алматы қаласында орналасқан ВВР-К реакторының жанындағы өсімдіктерде тритийді анықтау әдісін зерттеу және енгізу нәтижелері ұсынылған. *Қорытындылар:* Өсімдіктердегі тритийді анықтаудың әзірленген әдісін атом өнеркәсібі объектілерінің маңындағы тритий мен оның қосылыстарының құрамына радиациялық бақылау жүргізу үшін қолдануға болады. Ұсынылған деректер қоршаған орта компоненттерінде тритийдің жиналуын зерттеу бойынша жүйелі зерттеулердің қажеттілігін көрсетеді.

Түйінді сөздер: радиоэкология, өсімдік, тритий, меншікті белсенділік, ВВР-К типті реактор

Краснопёрова Марина Владимировна

PhD

Севериненко Мария Анатольевна

магистр

Харкин Павел Викторович

зертхана меңгерушісі

Мильи Ольга Сергеевна

магистр

*Макарова Варвара Александровна**магистр*

*Саналбай Жанар Кайраткызы**магистр*

Список литературы

1. Management of Waste Containing Tritium and Carbon-14, Technical Reports Series No. 421. Vienna: IAEA; **2004**. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS421_web.pdf
2. Мазаник К. В., Скибинская А. Н., Киевицкая А. И. Тритий в ядерном топливном цикле // Сахаровские чтения 2021 года: экологические проблемы XXI века. – 2021. – С. 276-279. DOI: 10.46646/SAKH-2021-2-276-279
3. Vostrotnin 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. – Т. 41. – №. 2. – С. S56. DOI 10.1088/1361-6498/abe8c8
4. Antonova, E.V., Antonov, K.L., Vasyanovich, M.E. *et al.* Tritium from the Molecule to the Biosphere. 1. Patterns of Its Behavior in the Environment. *Russ J Ecol* **53**, 253–284 (2022). <https://doi.org/10.1134/S1067413622040038>
5. Meng, D., Wang, W., Du, Y., et al., Tritium distribution in typical plants around tritium laboratory in south-west of China, *J. Environ. Radioact.*, 2021, vol. 227, art. ID 106504. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106504>
6. Shozugawa K. et al. Landside tritium leakage over through years from Fukushima Dai-ichi nuclear plant and relationship between countermeasures and contaminated water // Scientific Reports. – 2020. – Т. 10. – №. 1. – С. 19925. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76964-9>
7. Gusyev M. A. et al. Evaluating anthropogenic and environmental tritium effects using precipitation and Hokkaido snowpack at selected coastal locations in Asia // Science of The Total Environment. – 2019. – Т. 659. – С. 1307-1321. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.342>
8. Методика определения органических и неорганических соединений трития в пробах почвы и растительности. Свидетельство об аттестации № 5-4/22.01.00087-2012.
9. Kochetkov O. A., Monastyrskaya S. G., Kabanov D. I. Problems of anthropogenic tritium limitation (review) // Saratov Journal of Medical Scientific Research. **2013**. Vol. 9, № 4. P. 815–818.
10. Boyer C, Vichot L, Fromm M, Losset Y, Tatin-Froux F, Guetat P, et al. Tritium in plants: a review of current knowledge. *Environ Exp Bot* **2009**; 67:34–51. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.06.008>
11. Jeffers R, Parker G. Development, description and validation of a tritium environmental release model (TERM). *J Environ Radioact* **2014**; 127:95–104. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.10.002>
12. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments. Technical Reports. Series No. 472. Vienna: IAEA; **2010**. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/trs472_web.pdf
13. Gröning M., Dargie M., Tatzber H. Seventh IAEA intercomparison of low-level tritium measurements in water (TRIC2004) // International Atomic Energy Agency, Isotope Hydrology Laboratory, Vienna. – **2007**. <http://www-naweb.iaea.org/NAALIH/docs/intercomparison/Tric2004/TRIC2004-Report.pdf>

References

1. Management of Waste Containing Tritium and Carbon-14, Technical Reports Series No. 421. Vienna: IAEA; **2004**. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS421_web.pdf
2. Mazanik K. V., Skibinskaya A. N., Kievitskaya A. I. Tritium in the nuclear fuel cycle // Sakharov Readings 2021: Environmental Problems of the XXI century. - 2021. - С. 276-279. DOI: 10.46646/SAKH-2021-2-276-279
3. Vostrotnin 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. – Т. 41. – №. 2. – С. S56. DOI 10.1088/1361-6498/abe8c8

4. Antonova, E.V., Antonov, K.L., Vasyanovich, M.E. *et al.* Tritium from the Molecule to the Biosphere. I. Patterns of Its Behavior in the Environment. *Russ J Ecol* **53**, 253–284 (2022). <https://doi.org/10.1134/S1067413622040038>
5. Meng, D., Wang, W., Du, Y., et al., Tritium distribution in typical plants around tritium laboratory in south-west of China. *J. Environ. Radioact.*, 2021, vol. 227, art. ID 106504. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106504>
6. Shozugawa K. et al. Landside tritium leakage over through years from Fukushima Dai-ichi nuclear plant and relationship between countermeasures and contaminated water //Scientific Reports. – 2020. – T. 10. – №. 1. – С. 19925. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76964-9>
7. Gusyev M. A. et al. Evaluating anthropogenic and environmental tritium effects using precipitation and Hokkaido snowpack at selected coastal locations in Asia //Science of The Total Environment. – 2019. – T. 659. – С. 1307-1321. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.342>
8. Methodology for determination of organic and inorganic tritium compounds in soil and vegetation samples. Attestation certificate No. 5-4/22.01.00087-2012.
9. Kochetkov O. A., Monastyrskaya S. G., Kabanov D. I. Problems of anthropogenic tritium limitation (review) // Saratov Journal of Medical Scientific Research. **2013**. Vol. 9, № 4. P. 815–818.
10. Boyer C, Vichot L, Fromm M, Losset Y, Tatin-Froux F, Guetat P, et al. Tritium in plants: a review of current knowledge. *Environ Exp Bot* **2009**; 67:34–51. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.06.008>
11. Jeffers R, Parker G. Development, description and validation of a tritium environmental release model (TERM). *J Environ Radioact* **2014**; 127:95–104. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.10.002>
12. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments. Technical Reports. Series No. 472. Vienna: IAEA; **2010**. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/trs472_web.pdf
13. Gröning M., Dargie M., Tatzber H. Seventh IAEA intercomparison of low-level tritium measurements in water (TRIC2004) //International Atomic Energy Agency, Isotope Hydrology Laboratory, Vienna. – **2007**. <http://www-naweb.iaea.org/NAALHL/docs/intercomparison/Tric2004/TRIC2004-Report.pdf>