

Современные подходы к определению содержания органических соединений трития в объектах окружающей среды и биологических тканях

Варфоломеева К.В., Зеленцова С.А., Седнев К.А., Разин К.А., Репин В.С.

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Длительный сброс воды, содержащей тритий, из АЭС Фукусима-1 в Тихий океан приводит к постепенному перемещению трития в зоны рыболовства России и его накоплению в морепродуктах. Тритий включается в органические соединения, в том числе в морепродукты. При потреблении этих морепродуктов дозовые коэффициенты для органически связанных форм трития превышают значения для водных форм. Мониторинг органически связанных форм трития является важной частью радиационного контроля и оценки доз внутреннего облучения. Целью данного сообщения является обобщение современных подходов к определению органически связанного трития в объектах окружающей среды и биологических тканях. По результатам анализа научных публикаций в представленном сообщении дана краткая информация об известных, применяемых в настоящее время методах подготовки счетных образцов и методов измерения содержания органических соединений трития. Заключение: Современные методы определения органически связанного трития дают достоверные данные, но сложны и требуют стандартизации. Перспективными направлениями в определении содержания органически связанного трития являются совершенствование пробоподготовки, повышение эффективности перевода органически связанного трития в измеряемую форму, внедрение более чувствительных аналитических методов и развитие системы метрологического обеспечения.

Ключевые слова: АЭС Фукусима-1, сброс радиоактивной воды, органически связанный тритий, морепродукты, методы контроля, радиационная безопасность, население.

Введение

В результате ликвидации последствий аварии на АЭС Фукусима-1 на площадке станции накопились большие объемы высокорadioактивной воды, слив которой в Тихий океан после очистки был начат в 2023 году и будет продолжаться в течение 30 лет [1]. Распространение трития морскими течениями приведет к его постепенному накоплению в зонах рыболовства России, расположенных в районе Южных Курил, и накоплению в морепродуктах [2].

В силу своих физико-химических свойств тритий проникает и встраивается в водородсодержащие компоненты живых организмов и окружающей среды, где преобразуется: в водную форму (НТО, T_2O , DTO) [3, 4], в неорганически связанный тритий в свободной воде тканей (TFWT) и в органически связанный тритий (OBT), включающий обменную (E-OBT) и необменную (NE-OBT) формы [5].

Удельная активность трития в организмах обычно превышает удельную активность тритиевой несвязанной воды (НТО) в окружающей среде примерно в 1,5–4 раза для неорганически связанной формы трития и в 5–20 раз – для органически связанной [6]. Органические формы трития выводятся из организма гораздо медленнее водных форм [4], поэтому наблюдение за содержанием ОСТ в морепродуктах является актуальным.

Цель исследования – краткое обобщение современных подходов к определению органически связанного трития в объектах окружающей среды и биологических тканях.

Результаты и обсуждение

Использованы публикации по теме «методы определения содержания органических соединений трития в объектах окружающей среды и биологических тканях» в российских и зарубежных поисковых системах и базах данных научных статей (eLIBRARY.RU, КиберЛенинка, Google Scholar, Web of Science, Scopus, PubMed) за период 2016 – 2026 гг. В результате было найдено 186 публикаций из которых для анализа были выбраны основные, описывающих методы количественного определения органически связанного трития в объектах окружающей среды.

Анализ литературных данных позволил обобщить современные подходы к подготовке проб и определению органически связанного трития в объектах окружающей среды и биологических тканях.

Подготовка пробы: удаление свободной и обменной фракций трития

Первым этапом анализа содержания ОСТ в объектах окружающей среды и биологических тканях является подготовка пробы: отделение неорганически связанного трития

Варфоломеева Ксения Владимировна

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева

Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: varfolomeeva_k@mail.ru

в свободной воде тканей [7]. Наиболее распространёнными методами являются сублимационная сушка (лиофилизация), термовакуумная десорбция и азеотропная дистилляция. Термовакуумная десорбция позволяет сократить время пробоподготовки с нескольких дней до 2–3 часов [7, 8].

После удаления TFWT высушенный и измельчённый образец подвергают дополнительной обработке для исключения E-OBT. Стандартная процедура включает выдерживание сухого материала в нетритированной воде при комнатной температуре для достижения полного изотопного обмена между лабильным водородом образца и водой с последующей повторной сушкой [5, 7]. Данный этап критически важен, однако следует учитывать риск частичного расщепления органических молекул при длительной водной выдержке [5, 9]. Выделенная таким образом фракция NE-OBT является репрезентативной мерой долгосрочного накопления трития.

Методы перевода ОСТ в форму НТО

Термическое сжигание в трубчатой печи с катализатором

Данный метод нашел наибольшее распространение. Образец массой 4–8 г (биота) сжигают в атмосфере кислорода при температуре 600–850 °С в присутствии катализатора (CuO или Pt-Al₂O₃). Образующаяся вода улавливается в холодных ловушках [10, 11]. Выход восстановленного трития зависит от исходного образца и составляет 86–93 %. Для биоты разработаны усовершенствованные системы с трёхзонным контролем температуры и двухстадийной подачей воздуха, позволяющие сократить продолжительность обработки образца при сохранении выхода восстановленного трития на уровне 85–93 % [11].

Гипербарическое окислительное автоклавирование

Данный метод является инновационным и предназначен для образцов с высоким содержанием органики. Позволяет сжигать до 10 г материала при давлении кислорода 1,5–2 МПа, обеспечивая восстановление трития более 98 % [8]. Преимущество метода заключается в возможности анализа крупных проб, что методически важно при низких пределах обнаружения.

Мокрое окисление и метод Парра

Данный метод рассматривается как альтернатива термическому сжиганию. Органическое вещество окисляют растворами сильных окислителей (KMnO₄, Na₂O₂) с последующей перегонкой. Метод Парра основан на быстром окислении в стальном автоклаве под давлением кислорода с воспламенением; не требует дополнительной очистки полученной воды [12].

Масс-спектрометрия ³He

Масс-спектрометрия обладает высочайшей из всех известных методов чувствительностью и применима для измерения фоновых концентраций. Пробу ОСТ герметизируют и выдерживают несколько месяцев для накопления ³He – продукта распада трития – после чего измеряют на масс-спектрометре [12]. Время непосредственного анализа составляет около 30 минут. Недостаток – длительная выдержка.

Измерения

Конденсат НТО, полученный после окисления, смешивают со сцинтилляционной жидкостью и измеряют методом жидкостной сцинтилляционной спектрометрии. Эффективность счёта зависит от степени гашения пробы; для каждого вида пробы, содержащей ОСТ, строят калибровочные кривые по параметру гашения SQP(E). Минимальная детектируемая активность может достигать 0,5–3,4 Бк/кг сухого вещества [9].

Основные источники погрешностей и проблемы валидации:

К основным источникам погрешностей относятся:

1. Изотопное фракционирование, приводящее к систематической ошибке 5–50 % [9].
2. Лабораторное загрязнение при повышенном содержании трития в лабораторных помещениях [13].
3. Водная выдержка может растворять часть органических молекул, искажая результаты [8].
4. Сложности градуировки [8, 10].

Заключение

Современные подходы к определению ОСТ в объектах окружающей среды и биологических тканях представляют собой многоступенчатый процесс, включающий удаление TFWT и обменного трития, количественное окисление (термическое, гипербарическое, мокрое или масс-спектрометрическое) и измерение методом жидкостной сцинтилляционной спектрометрии. Основными проблемами остаются изотопное фракционирование, отсутствие стандартных образцов и риск лабораторного загрязнения исследуемых проб. Перспективными направлениями в определении содержания ОСТ являются разработка экспресс-методов удаления TFWT, внедрение гипербарических систем и проведение регулярных межлабораторных сличений.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Варфоломеева К.В. провела поиск и анализ литературных данных, отредактировала промежуточный и окончательный вариант рукописи.

Зеленцова С.А. провела поиск и анализ литературных данных, отредактировала промежуточный и окончательный вариант рукописи.

Седнев К.А. провел поиск и анализ литературных данных, отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Разин К.А. провел поиск и анализ литературных данных, отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Репин В.С. является научным руководителем отраслевой НИР, определил план написания статьи, цели и задачи, провел поиск и анализ литературных данных, написал черновик и представил окончательный вариант рукописи для публикации в журнал.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов при выполнении работы и подготовке данной статьи.

Сведения об источнике финансирования

Статья подготовлена в рамках выполнения НИР: «Исследование и радиационно-гигиеническая оценка содержания органических форм трития и углерода-14 в объектах окружающей среды и морепродуктах».

Литература

1. IAEA Comprehensive Report on the safety review of the ALPS-treated water at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. Vienna: IAEA, 2023. 129 p.
2. Попова А.Ю., Романович И.К., Репин В.С. и др. Обеспечение радиационной безопасности населения дальневосточных регионов Российской Федерации в условиях долговременного сброса воды с АЭС «Фукусима-1» // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 1. С. 7-23. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-7-23.
3. Koranda J.J., Martin J.R. The movement of tritium in ecological systems // Nu-clear Science Abstracts. 1972. Vol. 26. P. 430-455.
4. Антонова Е.В., Антонов К.Л., Васянович М.Е. и др. Тритий от молекулы до биосферы. 1. Закономерности поведения в окружающей среде // Экология. 2022. № 4. С. 255-288.
5. Гурьев Д.В., Кочетков О.А., Барчуков В.Г. и др. Биологические эффекты органических и неорганических соединений трития // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020. Т. 65, № 2. С. 5-10.
6. Барчуков В.Г., Кочетков О.А., Кузнецова Л.И. и др. Нормативно-методическое обеспечение контроля содержания органических соединений трития в объектах окружающей среды (современное состояние проблемы) // АНРИ. 2018. № 3(94). С. 8-16.
7. Krištof R., Čipánovska N., Kožar Logar J. Determining the amounts of organically bound tritium and radiocarbon using a combined preparation step and liquid scintillation spectrometry // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2023. Vol. 332. P. 1521-1526. DOI: 10.1007/s10967-022-08586-6.
8. Baglan N., Kim S.B., Cossonnet C. et al. Organically bound tritium (OBT) behaviour and analysis: outcomes of the seminar held in Balaruc-les-Bains in May 2012 // Radioprotection. 2013. Vol. 48, No. 1. P. 127-144. DOI: 10.1051/radiopro/2012051).
9. Le Goff P., Fromm M., Vichot L. et al. Isotopic fractionation of tritium in biological systems // Environment International. 2014. Vol. 65. P. 116-126. DOI: 10.1016/j.envint.2013.12.020.
10. Nayak S.R., D'Souza R.S., Kamath S.S. et al. Organically bound tritium: optimization of measurements in environmental matrices by combustion method and liquid scintillation spectrometry // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2019. Vol. 319. P. 917-926.
11. Pointurier F., Baglan N., Alanic G. et al. Determination of organically bound tritium background level in biological samples from a wide area in the south-west of France // Journal of Environmental Radioactivity. 2003. Vol. 68. P. 171-189.
12. Assessment of Organically-Bound Tritium (OBT) Dispersion in Cardiff Bay / University of Southampton. URL: <https://eprints.soton.ac.uk/464953/1/895136.pdf> (Дата обращения: 02.04.2026).
13. Тритий. Теория, практика, последствия : монография / Л. Г. Бондарева, М.Я. Чеботина, С.Ю. Артамонова, И.Г. Тананаев. Апатиты: Издательство Кольского научного центра, 2024. 359 с.

Поступила: 15.04.2026

Варфоломеева Ксения Владимировна – научный сотрудник лаборатории экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: varfolomeeva_K@mail.ru; ORCID: 0009-0008-3483-806X, РИНЦ Author ID: 654759

Зеленцова Светлана Александровна – научный сотрудник лаборатории экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0009-0005-2244-0028, РИНЦ Author ID: 700456

Седнев Константин Андреевич – младший научный сотрудник лаборатории экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия; ORCID: 0009-0006-7906-1106, РИНЦ Author ID: 1245560

Разин Кирилл Александрович – исполняющий обязанности младшего научного сотрудника лаборатории экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Репин Виктор Степанович – доктор биологических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; ORCID: 0009-0005-9897-0930, РИНЦ Author ID: 649799

Для цитирования: Варфоломеева К.В., Зеленцова С.А., Седнев К.А., Разин К.А., Репин В.С. Современные подходы к определению содержания органических соединений трития в объектах окружающей среды и биологических тканях // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 2. С. 140–144. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-140-144

Modern approaches to the determination of organically bound tritium in environmental media and biological tissues

Kseniya V. Varfolomeeva, Svetlana A. Zelentsova, Konstantin A. Sednev, Kirill A. Razin, Victor S. Repin

Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance of Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

The prolonged discharge of tritium-containing water from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant into the Pacific Ocean leads to the gradual transport of tritium into Russian fishing zones and its accumulation in marine products. Tritium is incorporated into organic compounds, including seafood. Upon consumption of these seafood products, dose coefficients for organically bound tritium forms exceed those for tritiated water forms. Monitoring of organically bound tritium constitutes a critical component of radiological surveillance and the assessment of internal exposure doses. The purpose of this communication is to summarize current approaches to determining organically bound tritium in environmental media and biological tissues. Based on an analysis of scientific publications, this communication provides brief information on established and currently used methods for preparing counting samples to measure the content of organic tritium compounds in environmental media and biological tissues. Conclusion: Modern methods for determining organically bound tritium provide reliable data but are complex and require standardization. Promising directions for determining organically bound tritium content include improving sample preparation, enhancing the efficiency of converting organically bound tritium into a measurable form, implementing more sensitive analytical methods, and developing a metrological assurance system.

Key words: Fukushima Daiichi NPP, radioactive water discharge, organically bound tritium (OBT), seafood, monitoring methods, radiation safety, population.

Authors' personal contribution

Kseniya V. Varfolomeeva conducted the literature search and analysis, and edited the interim and final versions of the manuscript.

Svetlana A. Zelentsova conducted the literature search and analysis, and edited the interim and final versions of the manuscript.

Konstantin A. Sednev conducted the literature search and analysis, and edited the interim version of the manuscript.

Kirill A. Razin conducted the literature search and analysis, and edited the interim version of the manuscript.

Victor S. served as the scientific supervisor of the branch research project, defined the manuscript writing plan, aims and objectives, conducted the literature search and analysis, drafted the manuscript, and prepared the final version for journal submission.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest in conducting the work and preparing this article.

Sources of funding

The article was prepared as part of the research project: "Investigation and radiological-hygienic assessment of the content of organic forms of tritium and carbon-14 in environmental objects and seafood".

References

1. IAEA. Comprehensive Report on the safety review of the ALPS-treated water at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. Vienna: IAEA; 2023. 129 p.
2. Popova AY, Romanovich IK, Repin VS, Varfolomeeva KV, Zelentsova SA, Sednev KA, et al. Ensuring radiation safety of the population of the Far Eastern regions of the Russian Federation under conditions of long-term discharge of water from the Fukushima-1 NPP. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026;19(1): 7-23. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-7-23.
3. Koranda JJ, Martin JR. The movement of tritium in ecological systems. *Nuclear Science Abstracts*. 1972;26: 430-455.
4. Antonova EV, Antonov KL, Vasyanovich ME, Panchenko SV. Tritium from molecule to biosphere. 1. Regularities of behavior in the environment. *Ekologiya = Ecology*. 2022;(4): 255-288. (In Russian).
5. Guryev DV, Kochetkov OA, Barchukov VG, Osipov AN. Biological effects of organic and inorganic tritium compounds. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2020;65(2): 5-10. (In Russian).
6. Barchukov VG, Kochetkov OA, Kuznetova LI, Kabanov DI, Surin PP. Regulatory and methodological support for control of organic compounds of tritium content in environmental objects (current state of the problem). *ANRI = Apparatus and news of radiation measurements*. 2018;3(94): 8-16. (In Russian).
7. Krištof R, Chipanovska N, Kožar Logar J. Determining the amounts of organically bound tritium and radiocarbon using a combined preparation step and liquid scintillation spectrometry. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2023; 332. P. 1521-1526. DOI: 10.1007/s10967-022-08586-6.
8. Baglan N, Kim SB, Cossonnet C, Croudace IW, Fournier M, Galeriu D, et al. Organically bound tritium (OBT) behaviour and analysis: outcomes of the seminar held in Balaruc-les-Bains in May 2012. *Radioprotection*. 2013;48(1): 127-144. DOI: 10.1051/radiopro/2012051.
9. Le Goff P, Fromm M, Vichot L, Badot P-M, Guétat P. Isotopic fractionation of tritium in biological systems. *Environment International*. 2014;65(2): 116-126. DOI: 10.1016/j.envint.2013.12.020.

Kseniya V. Varfolomeeva

Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev

Address for correspondence: 8, Mira Str., Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: Varfolomeeva_K@mail.ru

10. Nayak SR, D'Souza RS, Kamath SS, Mohan MP, Bharath S, Trilochana Sh, et al. Organically bound tritium: optimization of measurements in environmental matrices by combustion method and liquid scintillation spectrometry. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2019;319: 917-926.
11. Pointurier F, Baglan N, Alanic G, Chiappini R. Determination of organically bound tritium background level in biological samples from a wide area in the south-west of France. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2003;68: 171-189.
12. University of Southampton. Assessment of Organically-Bound Tritium (OBT) Dispersion in Cardiff Bay. Available from: <https://eprints.soton.ac.uk/464953/1/895136.pdf> [Accessed 02 April 2026].
13. Tritium. Theory, practice, consequences: monograph / Bondareva LG, Chebotina M Ya, Artamonova S Yu, Tananaev I G Apatity: Publishing House of the Kola Science Centre; 2024. 359 p.

Received: April 15, 2026

For correspondence: Kseniya V. Varfolomeeva – Research Fellow, Laboratory of Ecology, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia (8, Mira Str., Saint Petersburg, 197101, Russia, E-mail: Varfolomeeva_K@mail.ru); ORCID: 0009-0008-3483-806X, RSCI Author ID: 654759

Svetlana A. Zelentsova – Research Fellow, Laboratory of Ecology, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0009-0005-2244-0028, RSCI Author ID: 700456

Konstantin A. Sednev – Junior Researcher, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0009-0006-7906-1106, RSCI Author ID: 1245560

Kirill A. Razin – Acting Junior Research Fellow of the Ecology Laboratory, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene named after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

Viktor S. Repin – Doctor of Biological Sciences, Head of Ecology Laboratory of Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia; ORCID: 0009-0005-9897-0930, RSCI Author ID: 649799

For citation: Varfolomeeva K.V., Zelentsova S.A., Sednev K.A., Razin K.A., Repin V.S. Modern approaches to the determination of organically bound tritium in environmental media and biological tissues. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 2. P. 140–144. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-2-140-144