

Факторы, влияющие на объёмную активность трития в моче жителей Озерска

Финашов Л.В., Востротин В.В.

Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия

Производственное объединение «Маяк» является предприятием Государственной корпорации «Росатом», максимальные выбросы трития которого превосходят суммарные выбросы от всех остальных предприятий атомной промышленности и ядерной энергетики Российской Федерации. Население города Озерска, проживающее вблизи Производственного объединения «Маяк», длительно подвергалось и продолжает подвергаться внутреннему облучению от трития. Целью работы является исследование факторов, воздействующих на объёмную активность трития в моче у жителей города Озерска, находящегося в зоне влияния Производственного объединения «Маяк», оценка ожидаемых эффективных годовых доз внутреннего облучения от трития. Материалы и методы: Производился отбор проб мочи в 2016, 2017, 2018, 2021 и 2023 годах у жителей Озерска. Всего было собрано 218 проб, в том числе у 58 детей. Измерение объёмной активности трития в моче проводилось с помощью Quantulus-1220. Для сбора данных о факторах, влияющих на уровни трития в моче жителей, было проведено анкетирование. Статистическая обработка данных проводилась с помощью программного обеспечения Microsoft Excel и R. Результаты исследования и обсуждение: Уровни объёмной активности трития в моче жителей г. Озерска находились в диапазоне от 4 до 49 Бк/л. Создана многофакторная регрессионная модель, описывающая влияние факторов на объёмную активность трития в моче жителей при комбинированном пути поступления трития. Оценки ожидаемых эффективных доз жителей г. Озерска составляли менее 0,076 % от дозового предела 1 мЗв. Заключение: Исследование влияния ключевых факторов, воздействующих на объёмную активность трития в моче жителей, позволяет оценить реальные дозы внутреннего облучения и прогнозировать дозы при увеличении выбросов трития на предприятиях Государственной корпорации «Росатом», а также разработать подходы к ретроспективной оценке доз у населения.

Ключевые слова: тритий, путь поступления, объёмная активность мочи, внутреннее облучение, население, ожидаемая эффективная доза, радиационная безопасность, производственное объединение «Маяк», многофакторная регрессионная модель.

Введение

Тритий – радиоактивный изотоп водорода с высокой миграционной способностью, который быстро включается в обменные процессы животных и растений, мгновенно поступая во все звенья экологического кругооборота, оказывая значительное радиационное воздействие на население и окружающую среду, поэтому входит в список 7 наиболее опасных радионуклидов и включен в перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования¹ [1]. Согласно информации из отчетов НПО «Тайфун»², в период с 2014 по 2023 годы производственное объединение «Маяк» (ПО «Маяк») является предприятием Государственной корпорации «Росатом»

(ГК «Росатом») с максимальными выбросами трития в воздушную сферу, превосходящими суммарные выбросы от всех остальных предприятий атомной промышленности и ядерной энергетики Российской Федерации: средние значения 1320 ТБк/год, с диапазоном от 1150 ТБк (2014 год) до 1530 ТБк (2019 год). Значимыми источниками поступления трития в окружающую среду в зоне влияния ПО «Маяк», являются озера Кызылташ (Водоем В-2) и Старое Болото (В-17), находящиеся внутри его санитарно-защитной зоны (СЗЗ). Водоем В-2 служит открытым хранилищем естественного происхождения жидких радиоактивных отходов (ЖРО). В 2021 г. объёмная активность (ОА) трития в воде озера В-2 составляла ~16 кБк/л, что привело в процессе испарения воды с поверхности к поступлению 196 ТБк трития

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

²Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Научно-производственное объединение «Тайфун» (см. «Ежегодник «Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств» 2003-2024 гг.) URL: <https://www.rpatyphoon.ru/products/pollution-media.php> (Дата обращения: 01.09.2025) [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring Scientific and Production Association Typhoon (see "Annual Report on the Radiation Situation in Russia and Adjacent States" 2003-2024). Available from: <https://www.rpatyphoon.ru/products/pollution-media.php> [Accessed September 09, 2025] (In Russ.)]

Финашов Леонид Викторович

Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики

Адрес для переписки: 456783, Россия, Челябинская область, Озерск, Озерское шоссе, д. 19; E-mail: finashov@subi.su, finashov@sucmb.su

в воздух и поступлению 0,7 ТБк трития в воздух от прибрежных растений оз. Кызылташ, что превосходило суммарные выбросы трития от всех предприятий ГК «Росатом» РФ (179 ТБк) в данном году, кроме ПО «Маяк» [2, 3]. Средняя мощность выброса трития в атмосферу с акватории В-17, являющимся хранилищем тритиевых конденсатов с радиохимического производства, при испарении в 2021 г. оценивается в 290 ТБк [4]. Уровень годового поступления трития в окружающую среду от ПО «Маяк» и оз. Кызылташ, сопоставим с прогнозным уровнем поступления трития в окружающую среду в годы интенсивного обслуживания термоядерного реактора ИТЕР и прогнозных значений поступления трития при работе коммерческих термоядерных реакторов в будущем [2, 5].

В работе Е.Л. Телушкиной и С.Н. Демина, в период с 1981 по 1984 годы была проведена радиационно-гигиеническая оценка загрязнения внешней среды тритием и дозовых нагрузок на население в районе ПО «Маяк». Для определения ОА трития в моче у жителей населенных пунктов на расстоянии до 25 км от ПО «Маяк» и контрольного пункта, находящегося на расстоянии 50 км, произвели отбор 147 проб у детей в возрасте от 10 до 12 лет [6]. В заключительной работе Е.Л. Телушкиной с соавт. установлено, что ОА трития в моче жителей изменялась в зависимости от года исследования и была сопоставима с изменениями ОА трития в атмосферном воздухе, которая в значительной степени зависит от газоаэрозольных выбросов ПО «Маяк». Уровень ОА трития в моче жителей зависел от расстояния до ПО «Маяк»: на расстоянии до 10 км находился в диапазоне от 0,7 до 2,4 кБк/л и был в среднем статистически значимо в 2 раза выше ОА трития в моче жителей контрольного пункта, находящегося на расстоянии 70 км [7]. Однако ни в этих, ни в более поздних исследованиях не было представлено результатов моделирования, а также не исследовано влияние других факторов на ОА трития в моче населения [6–8].

Из вышеизложенного следует, что население города Озерска, проживающее вблизи ПО «Маяк», длительно подвергалось и продолжает подвергаться внутреннему облучению от трития. На 63-й сессии Научного комитета по действию атомной радиации Организации Объединенных Наций (НКДАР ООН) в документе R.715 «Биологические эффекты облучения от отдельных инкорпорированных радионуклидов» был предложен подход к мониторингу трития в окружающей среде вблизи предприятий, а также к мониторингу трития у отдельных людей, живущих на этих территориях. Указаны проблемы, связанные с надежностью эпидемиологических исследований из-за недостаточной статистической мощности и отсутствии информации о дозах облучения тритием у населения [9, 10].

Согласно данным, полученным на лабораторных животных и в исследовании на людях, обмен воды в организме является сложным процессом, имеющим сильную индивидуальную вариабельность, связанную с возрастом, полом, параметрами окружающей среды, количеством

мышечной ткани и наличием соматических патологий [11–13]. Одними из веществ, позволяющих оценить закономерности обмена воды в организме в экспериментальных и клинических исследованиях, являются оксиды трития и дейтерия, схожие по своим физическим и химическим свойствам с водой и отличающиеся относительной лёгкостью идентификации данных изотопов в жидкостях организма [11].

Таким образом, регулярный мониторинг ОА трития в моче жителей Озерска является актуальным и дает возможность оценить распределение уровней внутреннего облучения тритием и сопоставить его с дозовым пределом НРБ-99/2009 для населения, косвенно отследить динамику выбросов и сбросов трития ПО «Маяк», а также получить новые данные в ходе натурных исследований о факторах, влияющих на индивидуальную вариабельность водного обмена и уровень ОА радионуклида жителей, проживающих в условиях хронического поступления трития.

Цель исследования – исследование факторов, воздействующих на объемную активность трития в моче жителей города Озерска, находящегося в зоне влияния ПО «Маяк».

Задачи исследования

1. Определение уровней ОА трития в моче жителей г. Озерска Челябинской области.
2. Выявление основных факторов, влияющих на ОА трития в моче жителей г. Озерска Челябинской области и создание многофакторной регрессионной модели.
3. Оценка годовых ожидаемых эффективных доз (ОЭД) внутреннего облучения от трития у населения г. Озерска и сравнение с дозовым пределом.

Материалы и методы

Отбор проб мочи проводили в 2016, 2017, 2018, 2021 и 2023 году у жителей Озерска, профессионально не связанных с ПО «Маяк». Всего было собрано 218 проб (2016 г. – 30 проб, 2017 г. – 10 проб, 2018 г. – 13 проб, 2021 г. – 99 проб, 2023 г. – 66 проб), в том числе у 58 детей в возрасте от 2 до 17 лет (26 девочек и 32 мальчиков). Каждым участником исследования или его официальным представителем было подписано информированное согласие на участие в проводимом исследовании, а также согласие на обработку персональных данных. У каждого участника собраны анкетные данные. Для измерения ОА трития в моче были однократно отобраны утренние порции мочи в индивидуальные стерильные полипропиленовые контейнеры с завинчивающейся крышкой вместимостью 120 мл. Измерения ОА трития в моче были проведены в соответствии с методикой измерений (МИ)³, с пределом обнаружения 8 Бк/л, при измерении в течении 6 часов и относительной погрешностью $\pm 40\%$ ($P=0,95$) в диапазоне от 8 до 50 Бк/л [14]. Результаты измерения ОА трития в моче, оказавшиеся ниже предела обнаружения, обрабатывались как предварительные (то есть как есть) согласно Гост Р 572016-2016⁴.

³Методика выполнения измерения 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 № 222.0032/RA.RU.311866/2019 [Methods for measuring the volume activity of tritium in water and urine samples using a Quantulus-1220 liquidscintillation spectrometer; Federal State Unitary Enterprise South Ural Institute of Biophysics. Ozyorsk, 2016; certificate of certification No. 222.0032 / RA.RU.311866 / 2019 (In Russ.)]

⁴Гост Р 572016-2016 Национальный Стандарт Российской Федерации. Радиационный контроль. Представление Результатов Измерения. [GOST R 572016-2016. National Standard of the Russian Federation. Radiation control. Presentation of Measurement Results (In Russ.)]

В 2016 году для сбора данных о возможных факторах, предположительно влияющих на уровни ОА трития в моче людей, было проведено анкетирование, включающее в себя следующие вопросы: пол, возраст, место работы (учебы), адрес постоянного места жительства в Озерске, основной источник потребления воды дома (ИПВД) для питьевых и пищевых нужд. С 2017 года в анкету были добавлены вопросы об основном источнике потребления воды на работе (ИПВР), массе и длине тела. В качестве основного источника потребления воды для питьевых и пищевых нужд анкетировемым жителям предлагалось указать один из следующих вариантов: 1) «вода бутилированная» (произведенная за пределами города Озерска), 2) «вода водопроводная». Для расчета расстояния от ПО «Маяк» до места работы (учебы) и постоянного места жительства участников исследования использовался сервис «Яндекс. Карты». Точкой отсчета являлась координата [14].

В 2021 году четыре дня подряд одновременно отбирались пробы конденсата воздуха с использованием бытовых кондиционеров, расположенных в двух зданиях подразделений ЮУриБФ на расстоянии 6,0 км и 9,8 км от точки отсчета ПО «Маяк» с последующим измерением ОА трития по вышеуказанной МИ.

Для оценки индивидуальных годовых ОЭД от трития у жителей, в условиях стабильной радиационной обстановки на ПО «Маяк», использовались коэффициенты перехода от ОА трития в моче к ОЭД из собственной методики выполнения расчетов [14].

Статистическая обработка данных проводилась с помощью программного обеспечения Microsoft Excel и программы статистического анализа R версии 4.3.3 "Angel Food Cake" (использован дополнительный пакет «dunn.test»). Для построения модели зависимости ОА трития в моче населения от исследуемых факторов использовались регрессионные методы анализа. При этом для учета неопределенности результатов измерения использовали их статистический вес, обратно пропорциональный квадрату стандартного отклонения, равного абсолютной погрешности при $P=0,68$. Для сравнения нескольких выборок по медиане использовался критерий Краскела-Уоллиса и дополнительный тест Данна. Для проверки нормальности распределения доз использовался критерий Шапиро-Уилка.

Результаты и обсуждение

Результаты измерения ОА трития в моче 218 жителей находились в диапазоне от 4 Бк/л до 49 Бк/л со средним значением 21,9 Бк/л и среднеквадратичным отклонением 7,2 Бк/л. Три результата измерения ОА трития в моче оказались ниже предела обнаружения 8 Бк/л. Медианное значение ОА трития в моче населения г. Озерска, равное 22,5 Бк/л, было ниже диапазона значений ОА трития от 25 до 37 Бк/л в воде озера Иртыш, измеренного в период с 2014 по 2023 год, являющимся основным источником водоснабжения населения г. Озерск [14; 15]. Это свидетельствовало о разбавлении поступившего трития в организм за счет привозной пищи и бутилированной воды, произведенных на территориях, удаленных от техногенных источников трития.

В исследовании Е.Л. Мурашовой и В.А. Чудина показано, что в период с 2001 по 2002 годы средний уровень ОА трития в моче 19-ти жителей г. Озерска составлял $126,2 \pm 10,4$ Бк/л [8], что косвенно свидетельствует о снижении уровней выбросов и сбросов трития ПО «Маяк» в сравнении с более ранними работами [6, 7]. В исследовании 2015 года ОА трития в моче 50-ти жителей г. Заречный, расположенного рядом с Белоярской АЭС, была в диапазоне 12–65 Бк/л при среднем значении 39 Бк/л [16]. В канадском исследовании 2001 года ОА трития в моче трех жителей, проживающих на удалении 8, 10 и 200 км от тяжеловодного реактора, была равна 32,2, 15,9 и 6,5 Бк/л соответственно [17]. Таким образом, в этих двух работах уровни ОА трития в моче были сопоставимы с уровнями ОА трития данного исследования. В китайском исследовании 2015 года ОА трития в моче у 34-х взрослых жителей, проживавших на расстоянии 2, 10 и 22 км от атомной электростанции, находилась в диапазонах 1,26–6,73 Бк/л, 1,31–3,09 Бк/л и 2,21–3,81 Бк/л соответственно [18]. Во всех перечисленных работах не было разработано регрессионных моделей зависимости ОА трития в моче от возраста и расстояния до предприятия, проводящего сбросы и выбросы трития в окружающую среду.

Статистические характеристики анализируемой группы населения города Озерска представлены в таблице 1.

Таблица 1. Статистические характеристики анализируемой группы населения города Озерска
[Table 1. Statistical characteristics of the analyzed group of Ozyorsk population]

Параметр [Parameter]	Среднее [Average]	Медиана [Median]	Миним. [Min]	Максим. [Max]	СКО [SD]	СОШ [SE]
Возраст, лет [Age, years] (n=218)	37,6	40	2	83	21,4	1,4
Расстояние от ПО «Маяк» до дома, км [Distance between the Mayak PA and the home, km] (n=218)	8,6	8,6	7,5	9,6	0,5	0,03
Расстояние от ПО «Маяк» до работы, км [Distance between the Mayak PA and the job place, km] (n=218)	7,6	8,1	1,9	13,8	1,6	0,1
Длина тела, см [Body length, cm] (n=188)	160,2	164	92	198	20,4	1,5
Масса тела, кг [Body weight, kg] (n=188)	67	69	12	142	26,9	2,0
ОА трития в моче, Бк/л [Tritium VA in urine, Bq/l] (n=218)	21,9	21,5	4	49	7,2	0,5

Примечание: n – количество наблюдений; СКО – Среднеквадратическое отклонение; СОШ – Стандартная ошибка. [Note: n – number of observations; SD – Standard Deviation; SE – Standard error.]

В анализе исследовалось влияние на ОА трития в моче населения следующих факторов: пол, возраст, расстояния от ПО «Маяк» до дома и работы (учебы), ИПВД, ИПВР, длина и масса тела.

Статистические характеристики распределений ОА трития в моче у населения Озерска в зависимости от года отбора пробы показаны на рисунке 1 в виде «ящика с усами». Из рисунка 1 следует, что медианные годовые значения ОА трития в моче не превышали 40 Бк/л.



Рис. 1. Статистические характеристики распределений ОА трития в моче жителей г. Озерска в зависимости от года исследования. Линия внутри ящика – медиана; нижняя и верхняя грань ящика – размах между 25 % и 75 % квантилями. Горизонтальные черточки на конце «усов» – максимальное и минимальное значение (без учета выбросов)

[Fig. 1. Statistical characteristics of tritium VA distribution in the urine of Ozyorsk residents by years of investigation. (Note. Lines inside the box – median level; upper and lower borders of the box – the range between 25 % and 75 % quartiles. Horizontal dashes at the end of the whiskers – maximal and minimal values (not taking into account the releases))]

По критерию Краскела–Уоллиса было выявлено статистически значимое различие между ОА трития в моче жителей, отнесенных к разным годам отбора проб (Kruskal-Wallis Chi-squared = 64, 177; df = 4; p-value = 3,835 e-13). По дополнительному тесту Данна не было выявлено статистически значимых медианных различий ОА трития в моче между 2016 и 2023 годами (KW=0,86; p=0,19), а также 2018 и 2021 годами (KW=0,28; p=0,39). Таким образом, в последующий анализ

был введен фактор «Годы», учитывающий наличие или отсутствие статистически значимых различий ОА трития по медиане, разделяющий выборку на три группы (Группа Г1: 2016 и 2023 гг.; Группа Г2: 2018 и 2021 гг.; Группа Г3: 2017 г.).

Статистические характеристики распределений ОА трития в моче в зависимости от источника питьевого водоснабжения используемого дома представлены на рисунке 2.



Рис. 2 Статистические характеристики распределений ОА трития в моче жителей г. Озерска в зависимости от источника питьевого водоснабжения используемого дома

[Fig. 2. Statistical characteristics of tritium VA distribution in the urine of Ozyorsk residents in relation to the source of drinking water at home]

По критерию Краскела-Уоллиса было выявлено статистически значимое различие между медианами ОА трития в моче у групп жителей, использовавших бутилированную и водопроводную воду дома ($KW=43,3$; $p < 10^{-5}$).

Корреляционный анализ выявил два фактора, являющихся линейными переменными, статистически значимо влияющих на ОА трития в моче: слабая прямая корреляция по шкале

Чеддока с возрастом человека в годах ($r=0,13$; $p=0,042$), слабая обратная корреляция с расстоянием от постоянного места проживания до ПО «Маяк» ($r=-0,14$; $p=0,034$). На рисунке 3 представлен график зависимости ОА трития в моче жителей от расстояния до места проживания от ПО «Маяк».

На рисунке 4, представлен график зависимости ОА трития в моче жителей от возраста на момент исследования.

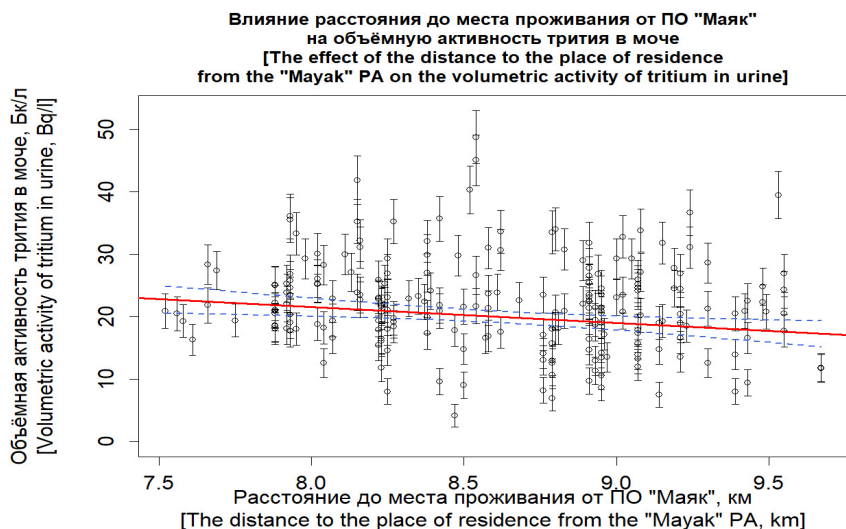


Рис. 3. График зависимости ОА трития в моче жителей от расстояния до места проживания от ПО «Маяк», км. Красная линия – линия регрессии модели. Синие пунктирные линии – верхняя и нижняя границы 95 % доверительного интервала модели. Черные кружки – отдельные наблюдения. Черные усы - соответствуют абсолютным погрешностям результатов измерения ОА трития в моче при $P=0,68$

[Fig. 3. Graph of the dependence of tritium VA in the urine of residents on the distance to the place of living to the Mayak PA, km. (Note: The red line – the model's regression line. Blue dotted lines – upper and lower borders of the 95 % confidence intervals of the model. Black circles – certain observations. Black whiskers correspond to absolute uncertainty of the results of measuring tritium VA in urine at $P=0.68$)]

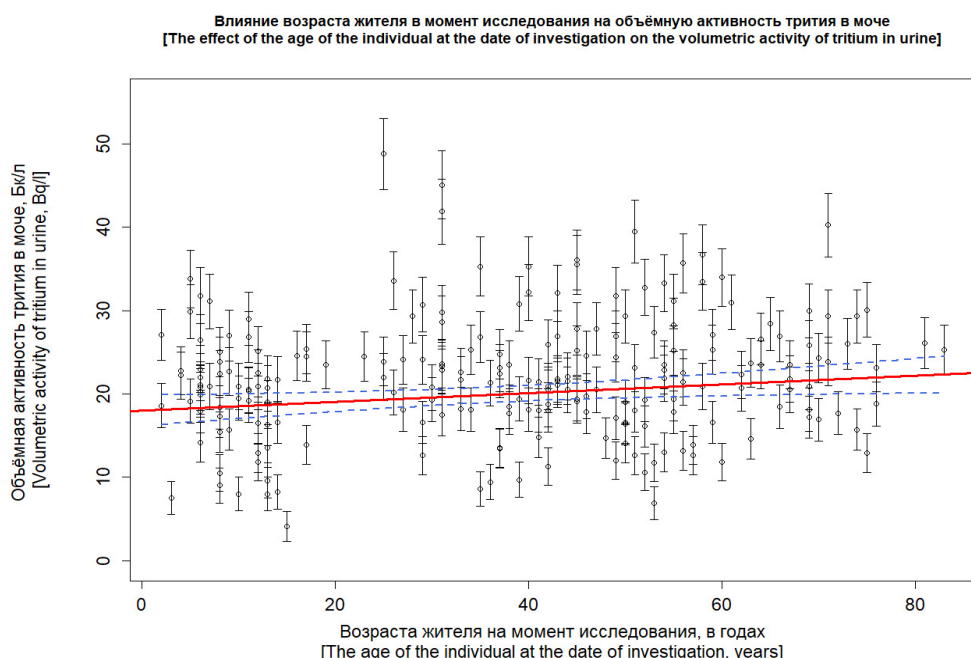


Рис. 4. График зависимости ОА трития в моче жителей от возраста на момент исследования, в годах. Красная линия – линия регрессии модели. Синие пунктирные линии – верхняя и нижняя границы 95 % доверительного интервала модели. Черные кружки – отдельные наблюдения. Черные усы - соответствуют абсолютным погрешностям результатов измерения ОА трития в моче при $P=0,68$

[Fig. 4. Graph of the dependence of tritium VA in the urine of residents from the age of the individual at the date of investigation, years. (Note: The red line – the model's regression line. Blue dotted lines – upper and lower borders of the 95 % confidence intervals of the model. Black circles – certain observations. Black whiskers correspond to absolute uncertainty of the results of measuring tritium VA in urine at $P=0.68$)]

Остальные факторы: пол, расстояния от ПО «Маяк» до места работы(учебы), источник питьевого водоснабжения на работе (учебе), длина и масса тела не оказывали статистически значимого влияния на ОА трития в моче жителей г. Озерска.

Как видно из информации, представленной на рисунке 3 и рисунке 4, возраст на момент исследования и расстояние

от ПО «Маяк» до постоянного места проживания оказывали разнонаправленное влияние на ОА трития в моче жителей г. Озерска, поэтому для оценки взаимного влияния значимых факторов на ОА трития в моче жителей был проведен многофакторный регрессионный анализ и создана модель №1:

$$OA = a_0 + \begin{cases} a_1, \text{ если } 2018, 2021 \text{ гг.} \\ a_2, \text{ если } 2017 \text{ г.} \end{cases} + \{b, \text{ если ИПВД} = 2\} + c \cdot B + d \cdot \text{РД}, \text{ Бк/л}$$

где a_0 – уровень отсечки ОА трития в моче жителя из подгруппы «Годы» = 2016 и 2023 и ИПВД=, Бк/л;

a_1 – дополнительный уровень ОА трития в моче жителя из группы «Годы» = 2018 и 2021, Бк/л;

a_2 – дополнительный уровень ОА трития в моче жителя из группы «Годы» = 2017, Бк/л;

b – дополнительный уровень ОА трития в моче при ИПВД=2, Бк/л;

c – коэффициент наклона ОА трития в моче населения

г. Озерска в зависимости от возраста, (Бк/л)/год;

B – возраст на момент обследования, год;

d – коэффициент наклона ОА трития в моче населения г. Озерска в зависимости от расстояния до места проживания от ПО «Маяк», (Бк/л)/км;

РД – расстояние от ПО «Маяк» до места проживания, км.

Численные значения параметров модели №1 и их ошибки представлены в таблице 2.

Таблица 2. Численные параметры модели №1

[Table 2. Numerical parameters of Model №1]

Параметр [Parameter]	Размерность [Unit of measurement]	Значение [Value]	Стандартная ошибка [Standard error]	p
a_0	Бк/л [Bq/l]	27,3	6,0	<0,001
a_1	Бк/л [Bq/l]	5,27	0,71	2,64e-12
a_2	Бк/л [Bq/l]	14,6	2,1	4,32e-11
b	Бк/л [Bq/l]	6,15	0,83	<0,001
c	(Бк/л)/год [(Bq/l)/year]	0,041	0,016	0,01267
d	(Бк/л)/км (Bq/l)/km]	-1,9	0,7	0,046

Примечание: 218 наблюдений, остаточное стандартное отклонение: 1,86 (df = 212), $R^2=0,49$; скорректированный $R^2 =0,47$; p-value: < 2,2e-16 [Note: 218 observations, residual standard error: 1.86 (df = 212), $R^2=0.49$; adjusted $R^2 =0.47$; p-value: < 2.2e-16].

Полученная модель объясняет 47 % дисперсии ОА трития в моче жителей, проживающих в г. Озерске, ошибка модели $\pm 5,4$ Бк, относительная стандартная ошибка модели ± 30 %, Модель описывает взаимное влияние факторов на ОА трития в организме жителей г. Озерска при комбинированном пути поступления трития: через воздух (ингаляционный и перкутанный пути поступления) и пероральный путь. Зафиксировано влияние расстояния от ПО «Маяк» до постоянного места проживания человека на ОА трития в моче, отражающая ингаляционное и перкутанное поступление трития с воздухом, с увеличением расстояния от ПО «Маяк» ОА трития в моче снижалась на $(1,9 \pm 0,7)$ Бк/л за каждый последующий километр. Таким образом максимальная разница ОА трития в моче жителей на границах жилой зоны г. Озерска, обусловленная ингаляционным и перкутанным поступлением, в среднем составляла $(9,7-7,5) \cdot 1,9=4,2$ Бк/л.

Также в 2021 году были проведены единичные измерения ОА трития в конденсате воздуха на расстояниях: 6,0 км (медиана: 900 Бк/л) и 9,8 км (медиана: 300 Бк/л) от ПО «Маяк». Было выявлено статистически значимое, более чем в 3 раза отличие по медиане, критерий Краскела –Уоллиса ($KW=5,33$, $p=0,021$) между указанными уровнями ОА

трития в конденсате воздуха. Очевидно, что фактор расстояния оказывает влияние на ОА трития во вдыхаемом воздухе населения г. Озерск. Оценка вклада ингаляционного и перкутанного поступления в суммарное поступление трития в организм жителей требует более масштабного исследования.

В предыдущей работе, основанной на данных, полученных у 30 жителей г. Озерска в 2016 году, была выявлена умеренная положительная корреляция между возрастом и ОА трития в моче ($r=0,34$, $p=0,038$) с коэффициентом наклона $(0,114 \pm 0,052)$ (Бк/л)/год. При этом предположение о влиянии возраста на ОА было отклонено в виду того, что в основном для питья дети использовали бутилированную воду, а взрослые – воду из централизованной системы водоснабжения [14].

В настоящем исследовании, в первую очередь за счет увеличения объема выборки, удалось выявить слабое влияние возраста на ОА трития в моче жителя с параметром $(0,041 \pm 0,016)$ (Бк/л)/год. Таким образом максимальная разница ОА трития в моче жителей для всех возрастов из выборки в среднем составляла $(83-2) \cdot 0,041=3,3$ Бк/л.

В качестве оценки радиационно-гигиенической обстановки г. Озерска от сбросов и выбросов трития

ПО «Маяк» в окружающую среду на основании индивидуальных измерений ОА трития в моче были рассчитаны индивидуальные годовые ОЭД. При расчетах использовались коэффициенты перехода от ОА к ОЭД со значениями 0,015 мкЗв/(Бк/л) для группы старше 12 лет и 0,016 мкЗв/(Бк/л) для группы старше 12 лет и взрослых. Статистические характеристики годовых ОЭД в зависимости от года сбора проб мочи совпадали со статисти-

ческими характеристиками ОА трития в моче с точностью до коэффициента перехода.

Гистограмма частотного распределения и функция плотности распределения исследуемой выборки по значению годовой ОЭД представлены на рисунке 5. Анализ выявил статистически значимое отличие данного распределения как от нормального ($W = 0,98$; $p = 0,004971$), так и от логнормального ($W = 0,957$; $p = 4,47e-06$).

Гистограмма оценки плотности вероятности распределения ожидаемой эффективной годовой дозы от трития у населения г.Озерска в 2016-18, 2021 и 2023 гг.
[Histogram of the assessment of probability density of the distribution of tritium-caused committed effective dose equivalent annual in Ozyorsk population in 2016-2018, 2021, and 2023.]

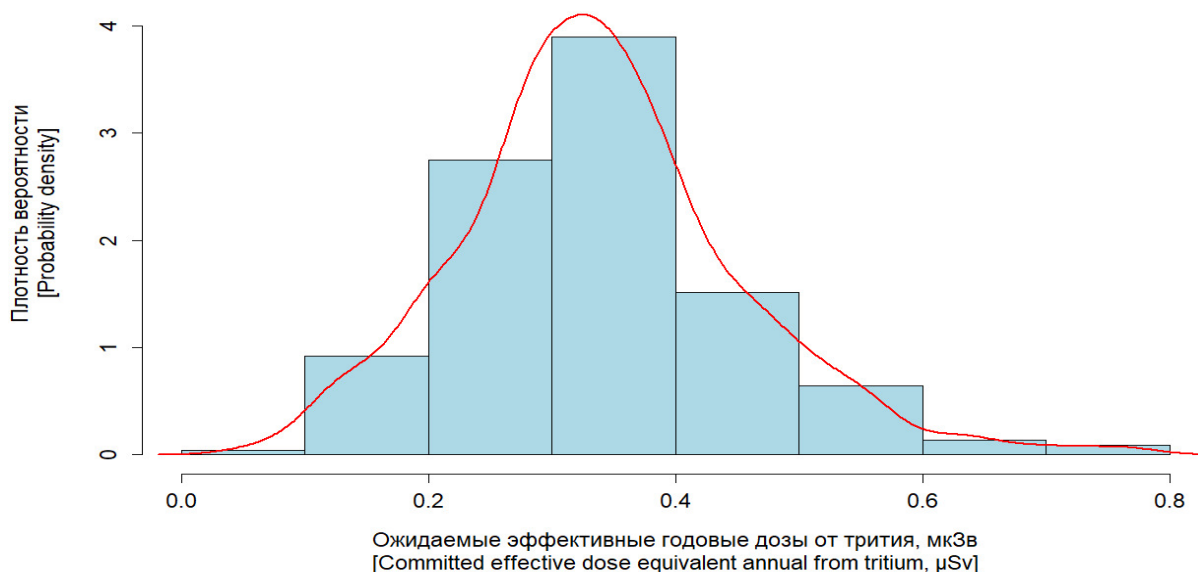


Рис. 5. Гистограмма оценки плотности вероятности с кривой плотности вероятности (красная линия) распределения ОЭД от трития у населения г. Озерска в 2016-18, 2021 и 2023 гг.

[Fig. 5. Histogram of the assessment of probability density with density curve of the probability (red line) of the distribution of tritium-caused CEDE in Ozyorsk population in 2016-2018, 2021, and 2023]

Основные статистические характеристики оценок годовых ОЭД от трития у населения г. Озерска, обусловленные поступлением в 2016-2018, 2021 и 2023 г. в условиях стабильной радиационной обстановки, полученные на выборке из 218 человек, были следующие: минимальное значение 0,07 мкЗв, среднее значение 0,33 мкЗв, коэффициент вариации 33 %, максимальное значение 0,76 мкЗв. Таким образом, за период наблюдения среднее значение ОЭД составляло 0,033 %, а максимальное значение – 0,076 % от предела годовой эффективной дозы для населения, равного 1 мЗв согласно «Норм Радиационной Безопасности»⁵.

Заключение

Исходя из полученных результатов анализа можно сделать следующие выводы:

1. Уровни ОА трития в моче жителей г, Озерска находились в диапазоне от 4 до 49 Бк/л.
2. Основными факторами, влияющими на уровень ОА трития в моче, являлись: год отбора проб мочи, основной

источник потребления воды дома для питьевых и пищевых нужд, расстояние от ПО «Маяк» до постоянного места жительства и возраст. Первые два фактора являлись групповыми (категорийными) переменными, последние два – линейно-непрерывными. Остальные факторы: пол, расстояние от ПО «Маяк» до места работы (учебы), источник питьевого водоснабжения на работе (учебе), длина и масса тела не оказывали статистически значимого влияние на ОА трития в моче жителей г. Озерска.

3. Создана многофакторная регрессионная модель оценки ОА трития в моче жителей г. Озерска при комбинированном пути поступления трития: через воздух (ингаляционный и перкутанный пути поступления) и пероральный путь.

4. Полученная модель объясняла 47 % дисперсии ОА трития в моче жителей со стандартной ошибкой $\pm 5,4$ Бк/л, относительная стандартная ошибка модели составляла ± 30 %.

⁵НРБ 99/2009 (СанПин 2.6.1.2523-09) [Radiation Safety Standards (NRB-99/2009), Sanitary-Epidemiological Rules and Norms, Moscow, Federal Center of Hygiene and Epidemiology Publ.,2009, 100 p. (In Russ.)]

5. Результаты единичных измерений объемной активности трития в конденсате воздуха на расстояниях 6,0 и 9,8 км от ПО «Маяк» указывают на статистически значимое, более чем в $\sim 900/300=3$ раза, отличие между ними. Данные измерений конденсата воздуха подтверждают значимое влияние на ОА трития в моче жителей г. Озерска расстояния от ПО «Маяк» до постоянного места жительства.

6. Оценки ОЭД жителей г. Озерска составляли менее 0,076 % от дозового предела 1 мЗв, т.е. были меньше его в 1300 и более раз. Таким образом, в рассматриваемом периоде с 2016 по 2023 годы выбросы и сбросы трития ПО «Маяк» не представляли радиологической опасности для населения г. Озерска.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

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.

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.

Благодарности

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

Информация о конфликте интересов

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

Сведения об источнике финансирования

Финансирование осуществлялось ФМБА России в рамках выполнения Государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) № 388-00097-25-00 от 25.12.2024.

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: 31.07.2025).
2. 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.
3. Востротин В.В., Янов А.Ю. Оценка уровня годового поступления трития в воздух с поверхности озера

Кызылташ // Радиационная гигиена. 2023. Т. 15, № 4. С. 88-96. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-88-96.

4. Мокров Ю.Г. Вклад радиохимического завода РТ-1 в формирование тритиевого загрязнения в районе деятельности ФГУП «ПО «Маяк» // Вопросы Радиационной Безопасности. 2024. Т. 114, № 2. С. 29-43.
5. 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. 013001.
6. Телушкина Е.Л., Демин С.Н. Радиационно-гигиеническая оценка загрязнения внешней среды тритием и дозовые нагрузки на население в районе радиохимического предприятия // Бюллетень радиационной медицины. 1987. № 1. С. 23-28.
7. Телушкина Е.Л., Демин С.Н. Динамика уровней содержания трития в атмосферном воздухе и организме жителей зоны наблюдения вокруг радиохимического комбината // Бюллетень радиационной медицины. 1988. № 1. С. 141-144.
8. Мурашова Е.Л., Чудин В.А. Оценка содержания трития в организме взрослого населения города Озерска // Вопросы радиационной безопасности. 2002. № 4. С. 57-60.
9. Уйба В.В., Аклеев А.В., Азизова Т.В. Итоги 63-й сессии Научного комитета по действию атомной радиации (НКДАР) ООН (Вена, 27 июня - 1 июля 2016 г.) // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2016. Т. 61, № 5. С. 69-79.
10. 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.
11. Москалев Ю.И. Окись трития / Под ред. проф. Ю.И. Москалева. Атомиздат. М.: 1968. 396 с.
12. Butler H.L., Leroy J.H. Observation of Biological Half-Life of Tritium // Health Physics. 1965. Vol. 11, № 4. P. 283-285.
13. Osborne R.V. Absorption of Tritiated Water Vapor by People // Health Physics. 1966. Vol. 12, № 11. P. 1527-1538.
14. Финашов Л.В., Востротин В.В., Янов А.Ю. Тритий в моче у жителей города Озерска Челябинской области в 2016 г. // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 3. С. 42-49. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-3-42-49.
15. Vostrotnin V.V., Yanov A.Yu., Finashov L.V. Tritium in environmental objects in the area affected by FSUE Mayak Production Association in 2014-15 // Journal of Radiological Protection. 2021. Vol. 41, № 2. DOI: 10.1088/1361-6498/abe8c8.
16. Чеботина М.Я., Николин О.А., Бондарева Л.Г. и др. Тритий в моче людей в зоне влияния Белоярской АЭС // Радиационная гигиена. 2016. Т. 9, № 4. С. 87-92. DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-4-87-92.
17. Kotzer T., Trivedi A. Dosimetric Implications of Atmospheric Dispersal of Tritium near a Heavy-water Research Reactor Facility // Radiation Protection Dosimetry. 2001. Vol. 93, № 1. P. 61-66.
18. Shen B.-M., Ji Ya.-Q., Tian Q. et al. Determination of Total Tritium in Urine from Residents Living in the Vicinity of Nuclear Power Plants in Qinshan, China // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2015. Vol. 12, № 1. P. 888-894. DOI: 10.3390/ijerph120100888.

Поступила: 12.09.2025

Финашов Леонид Викторович – заведующий лабораторией, научный сотрудник лаборатории радиационной гигиены, Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства. Адрес для переписки: 456783, Россия, Челябинская область, г. Озерск, Озерское шоссе, д.19; E-mail: finashov@subi.su, finashov@sucmb.su

ORCID: 0000-0003-2261-6589

Востротин Вадим Владимирович – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией, старший научный сотрудник лаборатории математического моделирования и программно-информационного обеспечения, Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия

ORCID: 0000-0002-3999-5223

Для цитирования: Финашов Л.В., Востротин В.В. Факторы, влияющие на объёмную активность трития в моче жителей Озерска // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 1. С. 113–122. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-113-122

Factors affecting the volume activity of tritium in the urine of Ozyorsk residents

Leonid V. Finashov, Vadim V. Vostrotin

Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical-Biological Agency, Ozyorsk, Russia

The Mayak Production Association is an enterprise of the Rosatom State Corporation, characterized by the highest tritium emissions, which exceed the total emissions from all other nuclear industry and nuclear power enterprises in the Russian Federation. Consequently, the population of Ozyorsk, residing in close proximity to the Mayak Production Association, has been and continues to be exposed to internal irradiation from tritium over a prolonged period. The aim of this study is to investigate the factors affecting the volumetric activity of tritium in urine samples from residents of Ozyorsk, a city located in the area influenced by the Mayak Production Association, to estimate the committed effective dose equivalent of internal exposure from tritium. Materials and Methods: Urine samples were collected from Ozyorsk residents in 2016, 2017, 2018, 2021, and 2023. A total of 218 samples were collected, including 58 samples from children. The volumetric activity of tritium in urine was measured using a Quantulus-1220 device. To collect data on factors influencing tritium levels in residents' urine, a questionnaire survey was conducted. Statistical analysis was performed using Microsoft Excel and R software. Results and Discussion: The volumetric activity levels of tritium in the urine of Ozyorsk residents ranged from 4 to 49 Bq/L. A multivariate regression model was developed to describe the influence of various factors on the volumetric activity of tritium in residents' urine under combined pathways of tritium intake. Estimates of the expected effective doses for Ozyorsk residents were less than 0.076 % of the dose limit of 1 mSv. Conclusion: Investigating the key factors affecting the volumetric activity of tritium in residents' urine allows not only to assess actual internal exposure doses but also to predict the doses in the event of increased tritium emissions from enterprises of the Rosatom State Corporation. Additionally, it facilitates the development of approaches for retrospective dose assessment in the population.

Key words: tritium, route of entry, volume activity, internal exposure, population, committed effective dose equivalent, radiation safety, Mayak production association, multifactorial regression model.

Authors' personal contribution

Finashov L.V. – significant contribution to the development of the study design; collection, analysis and interpretation of the data; writing the text of the manuscript and its editing for important intellectual content; approval of the final version of the manuscript for publication; agreement to be in charge of all the aspects of the manuscript, providing due research and solving the issues related to accuracy and integrity of any part of the work.

Vostrotin V.V. – significant contribution to the development of the study design; collection, analysis and interpretation of the data; writing the text of the manuscript and its editing for important

intellectual content; approval of the final version of the manuscript for publication; agreement to be in charge of all the aspects of the manuscript, providing due research and solving the issues related to accuracy and integrity of any part of the work.

Acknowledgements

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

Leonid V. Finashov

Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics

Address for correspondence: 19, Ozyorskoe Shosse, Ozyorsk, Chelyabinsk Region, 456783, Russia; E-mail: finashov@subi.su, finashov@sucmb.su

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests in the course of the research work and preparation of the manuscript.

Sources of funding

The funding was granted by FMBA of Russia in the framework of the Government assignment for state services (work contract) № 388-00097-25-00 as of 25.12.2024.

References

- Kalistratova VS, Belyaev IK, Zhorova ES, Nisimov PG, Parfenova I.M., Tishchenko G.S. et al. Radiobiology of incorporated radionuclides. Ed. by Kalistratova VS. Publ. Burnasyan FMBC of the FMBA of Russia; 2012. 464 p. (In Russian). URL: <http://ecoradmod.narod.ru/rus/publication2/RNMonografiya.pdf> [Accessed: 01.08.2025].
- Vostrotin VV, Finashov LV. Estimate of Tritium Intake in the Air from Coastal Plants of Lake Kyzyltash in 2021. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(2): 78-90. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-78-90.
- Vostrotin VV, Yanov AYu. Assessment of the level of annual intake of tritium into the air from the surface of the lake Kyzyltash. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(4): 88-96. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-88-96.
- Mokrov YG. Contribution of the radiochemical plant RT-1 to development of tritium contamination in the area of the Mayak PA activity. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Radiation safety issues*. 2024;114(2): 29-43 (In Russian).
- Abdou M, Riva M, Ying A, Day Ch, Loarte A, Baylor L, et al. Physics and technology considerations for the deuterium–tritium fuel cycle and conditions for tritium fuel self sufficiency. *Nuclear Fusion*. 2021;61(1): 013001. DOI:10.1088/1741-4326/abbf35.
- Telushkina EL, Demin SN. Radiation and hygienic estimates of tritium environmental contamination and dose loads for the population in the area of a radiochemical production facility. *Byulleten radiatsionnoy meditsiny = Radiation medicine report*. 1987;1: 23-28 (In Russian).
- Telushkina EL, Demin SN. Dynamics of tritium levels in the air and in the bodies of the residents of the observed area close to a radiochemical production facility. *Byulleten radiatsionnoy meditsiny = Radiation medicine report*. 1988;1: 141-144 (In Russian).
- Murashova EL, Chudin VA. Assessment of tritium content in the body of the adult population of the city of Ozyorsk. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Radiation safety issues*. 2002;4: 57–60 (In Russian).
- Uiba VV, Akleyev AV, Azizova TV, Geraskin SA, Ivanov VK, Koterov AN, et al. Results of the 63rd session of United Nations Scientific Committee on the effects of atomic radiation (UNSCEAR) (Vienna, June 27 – July 1, 2016). *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical radiology and radiation safety*. 2016;61(5): 69–79 (In Russian).
- Yanov AYu, 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). DOI: 10.14529/hsm160209.
- Moskalev Yul. Tritium oxide / Ed. by prof. Yul Moskalev. Moscow: Atomizdat; 1968. 396 p. (In Russian).
- Butler HL, Leroy JH. Observation of Biological Half-Life of Tritium. *Health Physics*. 1965;11(4): 283-285.
- Osborne RV. Absorption of Tritiated Water Vapor by People. *Health Physics*. 1966;12(11): 1527-1538.
- Finashov LV, Vostrotin VV, Yanov AYu. Tritium in urine in residents of Ozyorsk, the Chelyabinsk region in 2016. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(3): 42-49. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-3-42-49.
- Vostrotin VV, Yanov AYu, Finashov LV. Tritium in environmental objects in the area affected by FSUE Mayak Production Association in 2014-15. *Journal of Radiological Protection*. 2021;41(2). DOI: 10.1088/1361-6498/abe8c8.
- Chebolina MYa, Nikolin OA, Bondareva LG, Rakitsky VN. Tritium in Urine of People Living in The Area of Influence of the Beloyarskaya NPP. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2016;9(4): 87-92. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-4-87-92.
- Kotzer T, Trivedi A. Dosimetric Implications of Atmospheric Dispersal of Tritium near a Heavy-water Research Reactor Facility. *Radiation Protection Dosimetry*. 2001;93(1): 61-66. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a006414.
- Shen B-M, Ji Ya-Q, Tian Q, Shao X-Zh, Yin L-L, Su X. Determination of Total Tritium in Urine from Residents Living in the Vicinity of Nuclear Power Plants in Qinshan, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2015;12(1): 888-94. DOI: 10.3390/ijerph120100888.

Received: September 12, 2025

For correspondence: Leonid V. Finashov – Head of the Laboratory, Researcher at the Laboratory of Radiation Hygiene, Southern Urals Federal Research and Clinical Center of Medical Biophysics of the Federal Medical-Biological Agency (19, Ozyorskoe Shosse, Ozyorsk, Chelyabinsk region, 456783.; E-mail: finashov@subi.su, finashov@sucmb.su)
ORCID: 0000-0003-2261-6589

Vadim V. Vostrotin – Candidate of Biological Sciences, Head of the laboratory, Senior Researcher at the Laboratory of Mathematical Modeling and Software and Information Support, Southern Urals Federal Research and Clinical Center of Medical Biophysics of the Federal Medical-Biological Agency. Ozyorsk, Russia
ORCID: 0000-0002-3999-5223

For citation: Finashov L.V., Vostrotin V.V. Factors affecting the volume activity of tritium in the urine of Ozyorsk residents. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 1. P. 113–122. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-113-122