

Чеботина М.Я.<sup>1</sup>, Смагин А.И.<sup>2</sup>

## Тритий в водных средах г. Озёрска

<sup>1</sup>ФГБУН «Институт экологии растений и животных» УрО РАН, 620144, Екатеринбург, Россия;<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет», 454001, Челябинск, Россия

**Введение.** В статье представлены данные о концентрациях трития в различных типах водных сред (дождевые осадки, снеговые выпадения, вода озёр Иртыш, Б. Наного, Кызылташ и истока р. Теча, водопроводная вода, лёд из холодильника, моча людей) в пределах г. Озёрска и на непосредственно прилегающей к нему территории в зоне воздействия ПО «Маяк» на Южном Урале.

**Материалы и методы.** Для количественного определения трития в различных водных средах осуществляли отбор проб в период с 2002 по 2016 г. Анализ проб производили сцинтилляционным методом с использованием процедуры одноступенчатого электролитического обогащения.

**Результаты.** Результаты работы показали, что практически все водные среды в г. Озёрске по содержанию в них трития превышают уровень техногенного фона, установленный для Уральского региона. В среднем это превышение составляет 14, 11, 9, 19, 4, 6, 19 раз для дождевых осадков, снеговых выпадений, питьевой воды жилых помещений, замороженного льда, воды озёр Иртыш и Б. Наного, воды из истока р. Теча соответственно. Отмечены повышенные концентрации трития в моче людей г. Озёрска и прилегающей территории по сравнению с литературными данными для других регионов мира.

**Заключение.** Полученные результаты исследований позволили выявить уровни загрязнения водных сред г. Озёрска тритием относительно уровня техногенного фона. Данные работы свидетельствуют о необходимости разработки метода очистки выбросов и сбросов трития предприятиями атомной промышленности для снижения риска для населения.

**Ключевые слова:** тритий; г. Озёрск; ПО «Маяк»; дождевые осадки; снеговые выпадения; озёрная вода; питьевая вода; лёд; моча людей

Для цитирования: Чеботина М.Я., Смагин А.И. Тритий в водных средах г. Озёрска. *Гигиена и санитария*. 2021; 100 (2): 111-115.

https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-2-111-115

Для корреспонденции: Чеботина Маргарита Яковлевна, доктор техн. наук, вед. науч. сотр. ФГБУН ИЭРиЖ УрО РАН, 620144, Екатеринбург. E-mail: Chebotina@ipae.uran.ru

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

**Благодарность.** Исследование выполнено по теме госзадания.

**Участие авторов:** Чеботина М.Я. – концепция и дизайн исследования, сбор и обработка материала, статистическая обработка, написание текста, редактирование; Смагин А.И. – концепция и дизайн исследования, сбор и обработка материала, редактирование. Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Поступила 11.02.2020 / Принята к печати 18.09.2020 / Опубликована 30.03.2021

Margarita Ya. Chebotina<sup>1</sup>, Andrej I. Smagin<sup>2</sup>

## Tritium in the aquatic environment of Ozersk

<sup>1</sup>Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch RAS, 620144, Yekaterinburg, Russian Federation;<sup>2</sup>Chelyabinsk State University, 454001, Chelyabinsk, Russian Federation

**Introduction.** The article presents data on tritium concentrations in various types of aquatic environments (rainfall, snowfall, water from the Irtyash, B. Nanoga, Kyzyltash lakes, and the source of the Techa river, tap water, ice from the refrigerator, and urine) within the city of Ozersk and on the territory immediately adjacent to it in the impact zone of Mayak Production Center in the Southern Urals.

**Material and methods.** For the quantitative determination of tritium in various aqueous media, sampling was carried out from 2002 to 2016. Samples were analyzed by the scintillation method using a single-stage electrolytic enrichment procedure.

**Results.** Almost all aquatic environments in Ozersk in terms of their tritium content exceed the technogenic background established for the Ural region. On average, this excess is by 14, 11, 9, 19, 4, 6, 19 times for rainfall, snowfall, drinking water of residential premises, ice, the water of the Irtyash and B. Nanoga lakes, water from the source of the river Techa accordingly. Elevated concentrations of tritium in the urine of Ozersk people and the adjacent territory were noted in comparison with literature data for other regions of the world.

**Conclusion.** The obtained research results revealed the levels of pollution of the aquatic environment of Ozersk with tritium relative to the level of technogenic background. These works indicate the need to develop a method for cleaning tritium emissions and discharges by nuclear enterprises to reduce the risk to the population.

**Keywords:** tritium; Ozersk; Production Association “Mayak”; rainfall; snowfall; lake water; drinking water; ice; urine of people

**For citation:** Chebotina M.Ya., Smagin A.I. Tritium in moisture-containing natural environments of Ozersk. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2021; 100 (2): 111-115. https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-2-111-115 (In Russ.)

**For correspondence:** Margarita Ya. Chebotina, MD, Ph.D., DSci, leading researcher of the Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, 454001, Russian Federation. E-mail: Chebotina@ipae.uran.ru

**Information about the authors:**

Chebotina M.Ya., https://orcid.org/0000-0002-4276-6296

Smagin A.I., https://orcid.org/0000-0003-3374-8149

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Acknowledgements.** The study had no sponsorship.

**Contribution of the authors:** Chebotina M.Ya. – the concept and design of the study, collection and processing of material, statistical processing, writing a text, editing; Smagin A.I. – the concept and design of the study, collection and processing of material, editing. All co-authors – approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Received: February 11, 2020 / Accepted: September 18, 2020 / Published: March 30, 2021

## Введение

Качество природной среды является важным фактором, определяющим здоровье населения. Особенно остро этот вопрос стоит в городах, расположенных в районах размещения крупных энергетических объектов, где население наряду с другими антропогенными факторами подвергается воздействию радиации. Таким городом является Озёрск, расположенный в Челябинской области в зоне воздействия ПО «Маяк». Площадь города 657 км<sup>2</sup>, население 83 217 человек (данные на 2018 г.).

Озёрск расположен на южном берегу оз. Иртыш, одного из самых крупных озёр Челябинской области (см. рисунок). Площадь водоёма составляет ~ 60 км<sup>2</sup>, глубина 12–22 м. Озеро Иртыш служит источником питьевого водоснабжения жителей Озёрска и основным поставщиком воды для нужд ПО «Маяк». Водоём также используется для отдыха населения, любительской ловли рыбы, на западном берегу озера находится большое количество баз отдыха.

На примыкающей к городу территории расположены озёра Большая Наного и промышленный водоём Кызылташ. Озеро Б. Наного (площадь 5,3 км<sup>2</sup>, средняя глубина 4,2 м) примыкает с юго-запада к Озёрску и соединено протокой с оз. Иртыш. В результате сброса в водоём промышленных и бытовых стоков г. Кыштым вода в нём загрязнена тяжёлыми металлами, фосфатами, марганцем и прочими химическими веществами. Озеро Кызылташ (площадь 19 км<sup>2</sup>, средняя глубина 3,4 м) находится примерно в 2 км от Озёрска и служит в качестве водоёма-охладителя проточных ядерных установок ПО «Маяк». Наряду с технологическим сбросом горячих вод в водоём поступают коммунальные стоки и ливневая канализация с промплощадок атомного предприятия и Озёрска. Водоём имеет мощный слой иловых донных отложений (до 8 м), в которых сконцентрировано значительное количество химических и радиоактивных веществ [1].

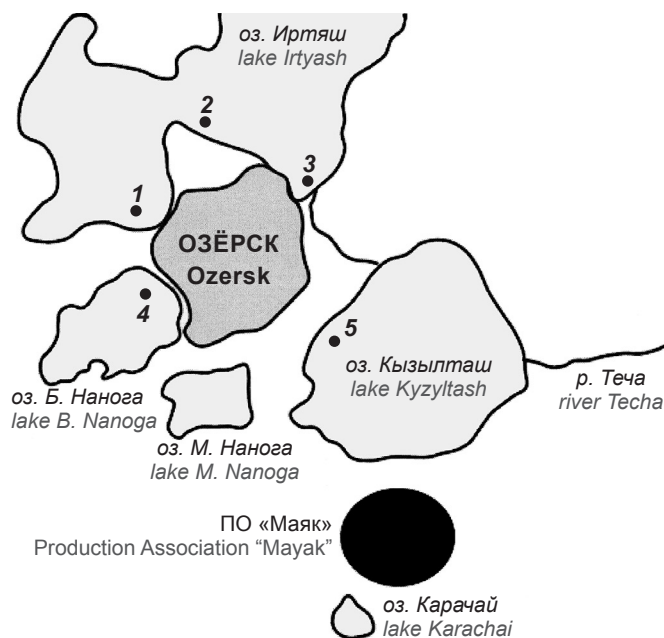
У северо-восточной окраины Озёрска протекает р. Теча. Она берёт своё начало в оз. Иртыш, затем уходит за пределы города в промзону ПО «Маяк». Между отрезком р. Теча на границе с оз. Иртыш и оз. Кызылташ в старом русле реки создан искусственный Буферный водоём, значительная часть которого представляет собой болото, заросшее тростником.

Среди долгоживущих радионуклидов, поступающих в природную среду от ПО «Маяк», особое место занимает тритий – радиоактивный изотоп водорода с периодом полураспада 12,4 года. Установившийся после прекращения массовых ядерных испытаний уровень концентрации трития в водных средах для разных регионов нашей страны, по данным ряда работ, варьирует в пределах 4–7 Бк/л при среднем значении 5 Бк/л [2–5]. Этот показатель подтверждён исследованиями авторов на примере различных природных водных сред севера Свердловской области, где отсутствуют предприятия ЯТЦ [6]. Поэтому величину 5 Бк/л, обусловленную вкладом трития естественного происхождения и прежними термоядерными испытаниями, условно можно считать уровнем техногенного фона по данному радионуклиду для Уральского региона, где проводились исследования.

Целью настоящей работы является установление уровней надфоновой загрязненности тритием влагосодержащих природных сред в районе Озёрска на Южном Урале.

## Материалы и методы

Объектами исследования служили дождевые и снеговые осадки, вода озёр Иртыш, Б. Наного, Кызылташ и истока р. Теча, водопроводная вода Озёрска, лёд из холодильника, моча людей. Дождевые осадки собирали после каждого дождя, а снег – в конце зимы до начала снеготаяния. Для сбора дождевых осадков использовали специальные поддоны площадью 55 × 50 см, которые устанавливали на высоте 1 м от поверхности почвы. Для сравнения отбирали осадки в контрольных районах (Чебаркуль, Екатеринбург). Пробы питьевой воды отбирали из водопровода города, куда она



**Карта-схема** расположения точек наблюдений в районе г. Озёрска: 1 – оз. Иртыш, б/о «Отважный»; 2 – место забора воды для снабжения г. Озёрска питьевой водой (водопровод города); 3 – исток р. Теча; 4 – оз. Б. Наного; 5 – оз. Кызылташ.

**Figure Schematic** map of the location of observation points in the area of Ozersk: 1 – lake Irtyash, recreation facility «Отважный»; 2 – place of water intake for supplying Ozersk with drinking water (city water supply); 3 – the source of the river Techa; 4 – lake B. Nanoga; 5 – lake Kyzyltash.

подаётся из оз. Иртыш (см. рисунок, т. 2). Озёрную воду брали из поверхностного слоя водного источника на глубине ~ 0–10 см. Мочу людей собирали в лабораториях медицинских учреждений. Исследуемый контингент включал людей разного пола, возраста и места работы. В отдельных случаях пробы мочи получали непосредственно у жителей Озёрска, не работающих на ПО «Маяк». Все пробы (0,5 л на повторность) помещали в стеклянные бутылки, закрывали пробками и транспортировали в Отдел континентальной радиоэкологии ИЭРЖ УрО РАН (г. Заречный).

Предварительную подготовку проб для радиометрического анализа производили путём их дистилляции с перманганатом калия. Пробы мочи очищали трижды, остальные пробы – один раз. Пробы из оз. Кызылташ анализировали без обогащения, остальные пробы – с использованием метода обогащения. Методика радиометрического определения трития с использованием метода электролитического обогащения подробно описана в монографии [6]. Просчёт проб осуществляли на американской установке «Дельта-300». Для оценки надёжности результатов неоднократно проводили сверку методов, применяемых в Институте экологии растений и животных и других научных организациях. Полученные результаты свидетельствуют о хорошей сходимости методов. Статистическую обработку данных производили с использованием компьютерной программы Statistica 5.5.

## Результаты

Результаты исследования (табл. 1) показали, что средняя концентрация трития в различных водных средах Озёрска варьирует от 19 до 97 Бк/л, а в озере Кызылташ она достигает 6300 Бк/л. Все показатели, включая минимальные, максимальные и средние значения концентраций радионуклида, превышают уровень техногенного фона по тритию для Уральского региона (5 Бк/л).

Таблица 1 / Table 1

**Уровни концентраций трития (Бк/л) в природных водных средах Озёрска**  
**Tritium concentration levels in natural aquatic environments of the city of Ozersk, Bq/l**

Объект исследования Object of study	Количество проб Number of samples	Минимальное значение Minimum value	Максимальное значение Maximum value	Среднее Average
Дождевые осадки Rainfall	35	11	430	70 ± 16
Снежный покров Snow cover	11	28	152	54 ± 13
Оз. Иртыш (см. рисунок, т. 1) Irtyash Lake (see figure, point 1)	3	18	21	19 ± 1.3
Оз. Б. Нанога (см. рисунок, т. 4) B. Nanoga Lake (see figure, point 4)	1			32
Водопроводная вода жилых домов Residential tap water	26	10	154	44 ± 7
Лёд из холодильника Ice from the refrigerator	7	10	149	97 ± 20
Вода в истоке р. Теча (см. рисунок, т. 3) Water at the source of the Techa river (see figure, point 3)	18	20	130	69 ± 7
Оз. Кызылташ (см. рисунок, т. 5) Kyzyltash Lake (see figure, point 5)	12	3190	15 300	6300 ± 1100

Содержание трития в моче для произвольной выборки из числа жителей Озёрска изменялось в широком диапазоне концентраций, при этом различия между крайними значениями составляли более 30 раз. У людей, не работающих на предприятии, этот показатель был заметно ниже, чем в среднем у всей совокупности испытуемых Озёрска (табл. 2).

### Обсуждение

Результаты проведённого исследования позволили установить, что все исследованные водные среды в Озёрске (дождевые и снеговые осадки, питьевая вода, вода из замороженного льда, вода прилегающих к городу водоёмов) загрязнены тритием в надфоновых концентрациях. В частности, среднее содержание трития в дождевых осадках Озёрска (70 ± 16 Бк/л) в несколько раз превышает аналогичные значения для других городов Уральского региона. Например, концентрация трития в дождевых осадках г. Чебаркуль (100 км на юго-восток от Озёрска) была почти в 5 раз меньше, чем в Озёрске, и составляла 15 ± 1.5 Бк/л (различие достоверно при  $p = 0,01$ ). Дождевые осадки в Екатеринбургe, расположенном в 120 км на юг от Озёрска и в 50 км от Белоярской АЭС, содержали примерно в 3–4 раза меньше трития (18 ± 1 Бк/л), чем осадки Озёрска ( $p = 0,0004$ ). Установлено, что важным потенциальным источником формирования загрязнения воздушной среды Озёрска тритием является реакторное производство ПО «Маяк» (завод РТ-2). Согласно работе [7], на двух площадках вблизи реакторного производства концентрация трития в дождевой воде в отдельные периоды наблюдений достигала 1000–2000 Бк/л при средних значениях 340–380 Бк/л, что примерно в 70–80 раз превышает уровень техногенного фона. С другой стороны, определённый вклад в загрязнение городской среды радионуклидом могут внести испарения воды с поверхности производственных водоёмов, расположенных в русле р. Теча [8]. Особое место среди них занимает оз. Кызылташ, расположенный в 2 км от города. Хотя средний уровень трития в воде озера (6300 Бк/л) не превышает уровень вмешательства, регламентирующий содержание трития в питьевой воде [9], наличие водоёма с подогретой водой на близком расстоянии от города наряду с постоянными воздушными выбросами радионуклида в атмосферу от реакторного производства способствует формированию надфоновых уровней загрязнения водных сред в Озёрске, в том числе дождевых и снеговых осадков. Подтверждением этому служат полученные в

Таблица 2 / Table 2

**Уровни концентраций трития (Бк/л) в моче жителей Озёрска**  
**Levels of tritium concentration in urine of residents of Ozersk, Bq/l**

Характеристика пробы Sample characteristics	Пациент, № Patient, No.	Концентрация трития Tritium concentration
Пробы мочи из медицинских учреждений Urine samples from medical institutions	1	1260
	2	1000
	3	840
	4	670
Пробы мочи жителей, не работающих на предприятии Urine samples from residents who do not work at the enterprise	5	67 ± 6
	6	49 ± 2
	7	37
	8	56
	9	130 ± 15

работе данные о достоверно ( $p = 0,003$ ) более высоком (по сравнению с водопроводной питьевой водой) содержании трития в замороженной в холодильнике ледяной массе, куда радионуклид дополнительно попадает из воздуха, тогда как в питьевую воду он поступает из оз. Иртыш.

Снег, как и дождевые осадки, проходя через воздушное пространство, поглощает тритий из воздуха и осаждает его на земной поверхности в ближних зонах от мест выброса. В течение всего зимнего периода снежный покров хорошо удерживает в себе поглощённый радионуклид, а в процессе снеготаяния тритий высвобождается из снеговой массы и включается в процессы миграции воды на прилегающих территориях. Исследования, проведённые в 30-километровой зоне ПО «Маяк» [10], показали, что повышенные уровни концентраций радионуклида в снежном покрове наблюдаются в непосредственной близости от ПО «Маяк», особенно в северном и северо-восточном направлениях (до 260 Бк/л), что примерно в 50 раз превышает уровень техногенного фона. На каждом из 4 направлений от предприятия средние уровни концентраций трития снижаются с увеличением расстояния от ПО «Маяк». В снеговой воде Озёрска содержание радионуклида от 5 до 30 раз превышает уровень техногенного фона для Уральского региона.

Таблица 3 / Table 3

**Уровни содержания трития в моче людей в различных странах мира**  
**Levels of tritium in people's urine in various countries of the world**

Страна, город Country, city	Условия проживания населения Living conditions of the population	Концентрация НТО, Бк/л Tritium free water (НТО) concentration, Bq/L	Литературный источник Reference
Китайская Народная Республика People's Republic of China	На разном расстоянии от Циньшаньской АЭС, км: At different distances from the Qinshan NPP, km:		[17]
	2	3.5 ± 1.6	
	10	2.1 ± 0.6	
	22	3 ± 0.8	
Финляндия Finland		2.55 – среднее / average 18.3 – максимальное / maximum	[18]
Канада Canada	Оттава, 200 км к востоку от исследовательского реактора Ottawa, 200 km east of research reactor	6.5	[19]
	10 км от реактора Дин-Ривер 10 km from Dean River Reactor	15.9	[19]
	2 км от Вольсунгской АЭС 2 km from Wolsung NPP	16.4–31.4	[20]
Республика Корея Republic of Korea		1.8–5.6 (среднее 2.8–1.4) 1.8–5.6 (average 2.8–1.4)	[21]
Россия, г. Заречный Russia, the town of Zarechny	Район Белоярской АЭС Beloyarsk NPP district	12.3–65.2	[13]

Результаты мониторинга трития в различных точках наблюдений на оз. Иртыш выявили некоторые различия между ними. В частности, в районе истока р. Теча (см. рисунок, т. 3) содержание трития в воде в среднем оказалось в 1,5 раза выше, чем в районе забора питьевой воды (см. рисунок, т. 2), и в среднем в 3 раза выше, чем около б/о «Отважный» (см. рисунок, т. 1). Можно предположить, что на повышение концентраций трития в пробах воды в истоке р. Теча влияют воздушные испарения с поверхности близко расположенного водоёма-охладителя Кызылташ, а также подток внутригрунтовых вод из буферного водоёма.

Содержание трития в моче людей является важным показателем качества среды обитания. По данным ряда работ, этот показатель варьируется в зависимости от места проживания и времени наблюдений, возраста, пола, места работы, наличия источников техногенного поступления трития и других факторов [11–13]. Согласно результатам работы [14], в моче детей Озёрска в период с 1980 по 1998 г. концентрация трития составляла в среднем 1140–1460 Бк/л, а на прилегающих территориях (Касли, Тюбук) – 810–1160 Бк/л. У взрослых мужчин и женщин Озёрска, не работающих на предприятии, этот показатель находился на уровне  $126 \pm 10$  Бк/л [15]. По данным работы [16], в моче людей, проживающих в зоне воздействия ПО «Маяк», содержание трития снижалось с увеличением расстояния до предприятия (Озёрск < Кыштым < Татыш < Метлино). Результаты исследований подтверждают, что жители Озёрска и прилегающей к ПО «Маяк» территории подвергаются хрониче-

ческому воздействию трития, о чём свидетельствуют повышенные уровни содержания радионуклида в моче.

Сравнение приведённых в табл. 2 результатов для зоны воздействия ПО «Маяк» с литературными данными для других территорий мира (табл. 3) подтверждают тот факт, что повышенные концентрации трития в моче жителей Озёрска являются следствием работы ПО «Маяк» и свидетельствуют о необходимости разработки методов очистки выбросов и сбросов трития для снижения риска для населения.

### Заключение

Приведённые в работе результаты исследования показали, что практически все водные среды в Озёрске по содержанию в них трития в среднем превышают уровень техногенного фона, установленный для Уральского региона. В совокупности с полученной ранее информацией [7, 8] можно утверждать, что наиболее существенный вклад в загрязнение города тритием вносят выбросы реакторного производства ПО «Маяк», вблизи которого среднее содержание радионуклида в дождевых осадках составляет 340–380 Бк/л, а также испарение с поверхности водоёма В-2 со средним содержанием радионуклида в воде ~ 6300 Бк/л. Ограниченное количество открытых публикаций о загрязнении тритием природной среды в крупных городах, расположенных в зонах воздействия атомных предприятий, и о возможных биологических эффектах от воздействия микроколичеств трития на организм человека [22–24] свидетельствует о необходимости дальнейших исследований в этом направлении.

### Литература

(п.п. 16–21, 23, 24 см. References)

- Смагин А.И. *Экология промышленных водоёмов предприятия ядерного топливного цикла на Южном Урале*. Озёрск; 2007.
- Махонько К.П., ред. *Радиоактивное загрязнение территории СССР в 1986 г. Ежегодник*. Обнинск: Тайфун; 1987.
- Иваницкая М.В., Малофеева А.И. Источники поступления трития в окружающую среду. В кн.: *Тритий – это опасно*. Челябинск: Челябинский Дом печати; 2001: 22–9.
- Дельвин Н.Н., Иванов А.Б., Крылов В.А., Носов А.В. Изучение содержания трития в водных объектах и приземной атмосфере в районе Калининской АЭС. В кн.: *Экология регионов атомных станций*. М.: Атомэнергопроект; 1996: 264–73.
- Гудков Д.И. Динамика содержания трития в пойменных водоёмах р. Припять и пруде-охладителе Чернобыльской АЭС. *Радиационная биология. Радиэкология*. 1999; 39(6): 605–8.

## Original article

6. Чеботина М.Я., Николин О.А. *Радиоэкологические исследования трития в Уральском регионе*. Екатеринбург; 2005.
7. Чеботина М.Я., Николин О.А., Мурашова Е.Л. Поступление трития на земную поверхность с дождевыми осадками. *Водное хозяйство России*. 2012; (5): 76–87.
8. Чеботина М.Я., Николин О.А., Мурашова Е.Л. Современные уровни концентраций трития в промышленных водоемах ФГУП ПО «Маяк». *Вопросы радиационной безопасности*. 2010; (4): 65–8.
9. НРБ-99/2009. Санитарные правила и нормативы. СанПИН 2.6.1.2523-09. Приложение 2а. М.; 2009.
10. Чеботина М.Я., Николин О.А., Смагин А.И. Тритий в снеговом покрове в зонах воздействия предприятий ядерно-топливного цикла на Урале. *Водное хозяйство России*. 2014; (2): 102–13.
11. МУ 2.6.1.15-02. Тритий и его соединения. Контроль величины индивидуальной эффективной дозы. М.; 2004.
12. Балонов М.И., Чипига Л.А. Оценка дозы поступления окиси трития в организм человек: роль включения трития в органическое вещество тканей. *Радиационная гигиена*. 2016; 9(4): 16–24.
13. Чеботина М.Я., Николин О.А., Бондарева Л.Г., Ракитский В.Н. Тритий в моче людей в зоне влияния Белоярской АЭС. *Радиационная гигиена*. 2016; 9(4): 87–92.
14. Демин С.Н. Тритиевая проблема — гигиенические аспекты. В кн.: *Тритий — это опасно*. Челябинск: Челябинский Дом печати; 2001: 13–21.
15. Мурашова Е.Л., Чудин В.А. Оценка содержания трития в организме взрослого населения города Озерска. *Вопросы радиационной безопасности*. 2002; (4): 57–60.
22. Журавлев В.Ф. *Токсикология радиоактивных веществ*. М.: Энергоатомиздат; 1990.

## References

1. Smagin A.I. *Ecology of Industrial Reservoirs of a Nuclear Fuel Cycle Enterprise in the Southern Urals [Ekologiya promyshlennykh vodoemov predpriyatiya yadernogo toplivnogo tsikla na Yuzhnom Urale]*. Ozersk; 2007. (in Russian)
2. Makhon'ko K.P., ed. *Radioactive Contamination of the USSR in 1986. Yearbook [Radioaktivnoe zagryaznenie territorii SSSR v 1986 g. Ezhegodnik]*. Obninsk: Tayfun; 1987. (in Russian)
3. Ivanitskaya M.V., Malofeeva A.I. Sources of tritium release to the environment. In: *Tritium is Dangerous [Tritiy — eto opasno]*. Chelyabinsk: Chelyabinskii Dom pechati; 2001: 22–9. (in Russian)
4. Del'vin N.N., Ivanov A.B., Krylov V.A., Nosov A.V. Study of tritium content in water bodies and surface atmosphere in the Kalinin NPP area. In: *Ecology of Regions of Nuclear Power Plants [Ekologiya regionov atomnykh stantsiy]*. Moscow: Atomenergoproekt; 1996: 264–73. (in Russian)
5. Gudkov D.I. Dynamics of tritium content in floodplain ponds of the river. Pripyat and the cooling pond of the Chernobyl nuclear power plant. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*. 1999; 39(6): 605–8. (in Russian)
6. Chebotina M.Ya., Nikolin O.A. *Radioecological Studies of Tritium in the Ural Region [Radioekologicheskie issledovaniya tritiya v Ural'skom regione]*. Ekaterinburg; 2005. (in Russian)
7. Chebotina M.Ya., Nikolin O.A., Murashova E.L. Tritium transport to the earth surface with rainfall. *Vodnoe khozyaystvo Rossii*. 2012; (5): 76–87. (in Russian)
8. Chebotina M.Ya., Nikolin O.A., Murashova E.L. Current levels of tritium concentration in FSUE Mayak PA industrial reservoirs. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti*. 2010; (4): 65–8. (in Russian)
9. NRB-99/2009. Sanitary rules and regulations. SanPIN 2.6.1.2523-09. Appendix 2a. Moscow; 2009. (in Russian)
10. Chebotina M.Ya., Nikolin O.A., Smagin A.I. Tritium in the snow cover in the areas affected by the nuclear fuel cycle in the Urals. *Vodnoe khozyaystvo Rossii*. 2014; (2): 102–13. (in Russian)
11. МУ 2.6.1.15-02. Tritium and its compounds. Control of individual effective dose. Moscow; 2004. (in Russian)
12. Balonov M.I., Chipiga L.A. Dose assessment for intake of tritiated water in humans: role of tritium incorporation in organic matter. *Radiatsionnaya gigiena*. 2016; 9(4): 16–24. (in Russian)
13. Chebotina M.Ya., Nikolin O.A., Bondareva L.G., Rakitskiy V.N. Tritium in urine of people living in the area of influence of the Beloyarskaya NPP. *Radiatsionnaya gigiena*. 2016; 9(4): 87–92. (in Russian)
14. Demin S.N. The tritium problem is hygienic aspects. In: *Tritium is Dangerous [Tritiy — eto opasno]*. Chelyabinsk: Chelyabinskii Dom pechati; 2001: 13–21. (in Russian)
15. Murashova E.L., Chudin V.A. Assessment of tritium content in the body of the adult population of the city of Ozersk. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti*. 2002; (4): 57–60. (in Russian)
16. Chebotina M.Ya., Nikolin O.A. The current tritium concentrations in human urine in the area of nuclear fuel cycle facilities. *Doklady Akademii Nauk*. 2012; 447(6): 390–391. <https://doi.org/10.1134/S0012496612060117>
17. Shen B.M., Ji Y.Q., Tian Q., Shao X.Z., Yin L.L., Su X., et al. Determination of total tritium in urine from residents living in the vicinity of nuclear power plants in Qinshan, China. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2015; 12(1): 888–94. <https://doi.org/10.3390/ijerph120100888>
18. Puhakainen M., Heikkinen T. Tritium in urine in Finnish people. *Radiat. Prot. Dosimetry*. 2008; 128(2): 254–7. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncm334>
19. Kotzer T., Trivedi T. Dosimetric implications of atmospheric dispersal of tritium near a heavy-water research reactor facility. *Radiat. Prot. Dosimetry*. 2001; 93(1): 61–6. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a006414>
20. Tritium analysis results of urine samples of Wolseong inhabitants living around heavy water reactor. WSNESC Report; 2011.
21. Yoon S., Ha W.H., Lee S.S. Tritium analysis of urine samples from the general Korean public. *Appl. Radiat. Isot.* 2013; 81: 276–8. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.03.011>
22. Zhuravlev V.F. *Toxicology of Radioactive Substances [Toksikologiya radioaktivnykh veshchestv]*. Moscow: Energoatomizdat; 1990. (in Russian)
23. Fairlie L. A hypothesis to explain childhood cancer near nuclear power plants. *J. Environ. Radioact.* 2014; 133: 10–7. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.07.024>
24. Wakeford R. The risk of leukaemia in young children from exposure to tritium and carbon-14 in the discharges of German nuclear power stations and in the fallout from atmospheric nuclear weapons testing. *Radiat. Environ. Biophys.* 2014; 53(2): 365–79. <https://doi.org/10.1007/s00411-014-0516-y>