

ТРИТИЙ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА: ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ И АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ ИЗУЧЕНИЯ С ПОЗИЦИЙ РАДИОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ

А.Ю. Янов^{1,2}, В.В. Востротин², Л.В. Финашов²

¹Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск,

²Южно-Уральский институт биофизики, г. Озерск

Цель. Изучить современное состояние и анализ перспектив трития в окружающей среде Уральского региона с позиций радиологической защиты. **Результаты.** Результаты исследований водных объектов, воздуха показывают, что в большинстве объектов окружающей среды Уральского региона объемная активность трития не превышает уровня вмешательства. Однако существуют природные объекты, в которых объемная активность трития значительно превышает фоновые значения. **Заключение.** При анализе перспектив изучения распределения трития в объектах окружающей среды определено, что наиболее эффективными с позиций радиологической защиты будут научные исследования, проводимые в соответствии с документом R.709 Научного комитета по действию Атомной радиации (НКДАР) ООН «Биологические эффекты облучения от отдельных инкорпорированных радионуклидов».

Ключевые слова: тритий, уровень вмешательства, радиологическая защита, органически связанный тритий, предприятия ядерно-топливного цикла.

Введение. Проблемы радиологической безопасности и загрязнения окружающей среды радиоактивными выбросами являются актуальными, в связи со свойствами радиоактивного излучения оказывать воздействие на живые организмы. В настоящее время основным источником радиации антропогенного происхождения являются предприятия ядерно-топливного цикла (ЯТЦ). Одним из радиоактивных изотопов, который образуется в процессе работы предприятий ЯТЦ, является тритий.

При испытаниях ядерного оружия в 50–60-х годах прошлого столетия происходило наиболее массовое загрязнение тритием воздушных масс и поверхности планеты. При ядерном взрыве мощностью 1 мегатонна в тротиловом эквиваленте происходил выброс трития с общей активностью 740 ПБк (1 ПБк – 10^{15} Бк). Всего в ходе испытаний количество образовавшегося трития составило 186 000 ПБк [27]. После запрета на надземные испытания ядерного оружия количества трития в атмосфере и водах планеты стало сокращаться.

Однако в связи с увеличением количества предприятий ядерного топливного цикла и

специализированных предприятий по производству трития возрастает возможность загрязнения окружающей среды радиоактивными выбросами.

По данным Консультативной группы по вопросам ионизирующего излучения (Advisory Group on Ionising Radiation) суммарный выброс трития от АЭС в Великобритании в 2006 г. составил 2600 ТБк. В том же году выброс завода по производству трития в Чапелькросс составил 300 ТБк, а лабораториями в г. Кардифф – около 300 ТБк, 10 % из которых являлись жидкими. Жидкие сбросы этой лаборатории представляют особый интерес, поскольку они включают различные тритий-меченые органические соединения, предназначенные для использования в фармацевтической промышленности и научных исследований [32].

В настоящее время вопросам изучения свойств трития в объектах окружающей среды посвящено много исследований, целью которых является изучение его физико-химических особенностей, установление уровня концентрации радионуклида в природных объектах и живых организмах, пути его поступле-

ния в организмы и кинетики выведения, распределения и миграции трития в экосистемах.

Для трития характерен β -распад; при распаде ядро трития превращается в ядро следующего в периодической таблице элемента – гелия с испусканием электрона. Тритий является низкоэнергетическим β -излучателем, со средней энергией β -излучения 5,8 кэВ и максимальной энергией излучения 18,5 кэВ. Период полураспада составляет 12,34 года. При объемной активности 1 Бк/л его количество составляет $1:10^{17}$ молекул воды [30].

В окружающую среду тритий попадает при работе атомных реакторов и предприятий по переработке ядерного топлива, которые являются мощными генераторами антропогенного трития [32]. В связи с физико-химическими особенностями трития в настоящее время не разработаны эффективные методы его улавливания, поэтому вместе со сбросами и выбросами предприятий ядерно-топливного цикла (ЯТЦ) он поступает в природные экосистемы.

Выбросы трития предприятиями представляют в основном соединения типа НТ и НТО [18, 25, 29]. Обладая высокой химической активностью, тритий в окружающей среде достаточно быстро окисляется кислородом воздуха и может образовывать соединения типа НТО. Исследования поведения тритированного водорода (НТ) в окружающей среде показывают, что он может распределяться и депонироваться в почве, переходя в НТО в результате ферментативных процессов [35], а также без участия живых организмов образовывать органические соединения, содержащие тритий-формальдегид, летучие органические кислоты [24, 26].

Тритий отличается от других радиоизотопов малым пробегом β -частиц в тканях живых организмов – от 0,6 мкм [28]. В результате он создает высокую плотность ионизации в тканях. При поражении им преимущественно облучаются те структуры клеток и тканей, в которые тритий проникает с пищей, при вдыхании или диффундируя через кожные покровы [28].

В живых организмах радионуклид может находиться в виде двух основных форм: оксида трития (НТО) и органических соединений трития или органически связанного трития (ОСТ).

Оксид трития, так же как и вода, участвует во всех биохимических процессах организма.

В результате образуются вещества, содержащие органически связанный тритий. При этом синтезированные вещества, содержащие тритий, будут присутствовать во всех клетках и клеточных структурах организма. Распространяясь во всех структурах организма органические соединения трития представляют собой серьезный фактор риска для человека, особенно опасным является включение трития в состав ДНК [28]. Атомы трития, входящие в состав биологических молекул (ДНК, РНК, белки и др.), при распаде превращаются в изотоп гелия (^3He), что может привести к разрушению молекул, или разрушению водородных связей в полимерных молекулах [18], как следствие – изменению конформаций молекул или полному их разрушению, с нарушением или прекращением функционирования.

Период полувыведения трития из организма человека в виде НТО составляет около 10 дней, а для ОСТ от 40 дней до года и более, и зависит от вида ОСТ, т. е. от того, в состав каких органических соединений он входит [33, 36].

Нормы радиационной безопасности по тритию

В течение времени происходило постоянное изменение допустимой активности трития в окружающей среде. В табл. 1 приведено соотношение допустимых для населения объемных активностей трития в воздухе и в питьевой воде по старым и действующим нормам радиационной безопасности (НРБ).

Приведенные в табл. 1 данные показывают, что уровни вмешательства по тритию в России имеют тенденцию к снижению, это может быть связано с переоценкой значимости вклада трития в уровень облучения человека.

В различных странах применяются собственные значения допустимых уровней вмешательства по тритию. Так в питьевой воде: в Канаде – 7000 Бк/л, в США – 740 Бк/л, в странах Европейского союза – 100 Бк/л. Следует отметить, что, так же как и в России, более строгие ограничения были приняты в Канаде по сравнению с 70-ми годами прошлого столетия, когда уровень вмешательства составлял 40 000 Бк/л. В отдельных штатах США установлены собственные пределы активности трития в питьевой воде, так в штате Колорадо он составляет 18,5 Бк/л, а в штате Онтарио 15 Бк/л [28].

Существующие данные свидетельствуют о том, что в настоящее время не существует

Таблица 1

Table 1

Допустимые для населения объемные активности трития в воздухе и в питьевой воде по старым и действующим нормам радиационной безопасности

Permissible tritium volumetric activities in the air and drinking water according to old and actual radiation protection standards and norms

Воздух, Бк/м ³ Air, Bq/m ³			Питьевая вода*, Бк/л Drinking water, Bq/l			
НРБ-76/87 [7] ДК _Б PL	НРБ-96 [5] ДОА _{НАС.} PVAp	НРБ-99 [6] НРБ-99/2009 [19] ДОА _{НАС.} PVAp	НРБ-76/87 ДК _Б PL	НРБ-96 ДУА _{НАС.} PSAp	НРБ-99 УВ IL	НРБ-99/2009 УВ IL
11 · 10 ³ (пары) (vapor)	7,6 · 10 ³	1,9 · 10 ³	1,5 · 10 ⁵	3 · 10 ⁴	7,7 · 10 ³	7,6 · 10 ³

Примечание. ДК_Б – допустимый уровень объемной активности радионуклида; ДОА_{НАС.} – допустимая объемная активность радионуклида для населения; ДУА_{НАС.} – допустимая удельная активность радионуклида для населения; УВ – уровень вмешательства для населения.

Note. PL – permissible level of radionuclide volumetric activity; PVAp – permissible radionuclide volumetric activity for population; PSAp – permissible radionuclide specific activity for population; IL – intervention level for population.

единых подходов к оценке влияния трития на организм человека, и, как следствие, очень большой разброс в показателях уровня вмешательства для трития в питьевой воде.

Радиационная обстановка, обусловленная тритием, на территории Российской Федерации

В табл. 2 представлены десятилетние результаты исследования объектов окружающей среды в Российской Федерации (РФ) специалистами НПО «Тайфун». В приведенных данных наблюдается снижение активности трития по изучаемым объектам в течение срока наблюдения. Уменьшение объемной активности трития в атмосферных осадках приводит к уменьшению плотности его выпадения с осадками и как следствие снижению активности радионуклида в поверхностных водах, в частности в реках РФ.

Среднемесячные значения объемной активности трития в осадках, в период с 2011 по 2014 г. представлены на рис. 1. На графиках отображена динамика ее изменений по месяцам, с повышенными значениями в теплый период года с мая по сентябрь, устойчиво повторяющийся из года в год.

На рис. 2 показаны среднемесячные значения объемной активности трития в атмосферных осадках, его среднемесячные выпадения из атмосферы и среднемесячные количества атмосферных осадков, усредненные по 33 пунктам наблюдений НПО «Тайфун» на территории РФ в 2014 г. [11].

На графиках отчетливо выражено сезонное изменение величины выпадений трития из атмосферы его объемной активности. Объемная активность и плотность выпадения трития заметно увеличиваются в теплый период года, в 1,5 и 3,5 раза соответственно, как и среднемесячная сумма атмосферных осадков.

Средние месячные выпадения трития из атмосферы с осадками в 2014 г. колебались в пределах 35–125 Бк/м², составив в среднем 67 Бк/м². Средняя величина среднемесячных выпадений уменьшилась по сравнению с предшествующими годами (в 2013 г. – 85 Бк/м²), как и сумма выпадений по территории РФ в целом – 13,7 · 10¹⁵ Бк (в 2013 г. – 17,7 · 10¹⁵ Бк).

Выпадения на всю территорию РФ оценивались как произведение средней плотности годовых выпадений трития на территории РФ и площади территории, которая составляет 17,075 · 10⁶ км².

На рис. 2 хорошо выражена устойчивая закономерность увеличения плотности выпадения трития в июне – сентябре, что повторяет годовой ход его объемной активности в атмосферных осадках.

Приведенные данные об активности трития в атмосферных осадках показывают, что наблюдаемые уровни обусловлены: тритием естественного происхождения; термоядерными взрывами, проведенными до 1980 г. в атмосфере; выбросами и сбросами трития в окружающую среду предприятиями ядерно-топливного цикла [4, 34].

Таблица 2

Table 2

Средние значения активности трития объектов окружающей среды на территории РФ в 2005–2014 годах [11]

Mean values of tritium activity for environmental objects in the RF in 2005–2014 [11]

Единицы измерений Units of measurement	Среднегодовые данные Annual average										Допустимые уровни Permissible levels
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	
Воздух Air											
Атмосферные выпадения трития Tritium concentration in precipitation											
кБк/ м ² год kBq/m ² year	1,39	1,4	1,4	1,34	1,21	1,15	1,21	1,26	1,04	0,8	Нет No
Объемная активность трития в атмосферных осадках Tritium volumetric activity in precipitation											
Бк/л Bq/l	2,8	2,8	2,4	2,6	2,5	2,2	2,5	2,3	1,9	1,7	Нет No
Вода Water											
Объемная активность трития в речной воде Tritium volumetric activity in river water											
Бк/л Bq/l	1,8-3,5	1,9-3,5	1,9-3,8	2,1-3,3	1,6-3,1	1,6-2,9	1,6-2,5	1,3-3,4	1,2-2,7	1,2-2,4	УВ Бк/л IL Bq/l
											7 600

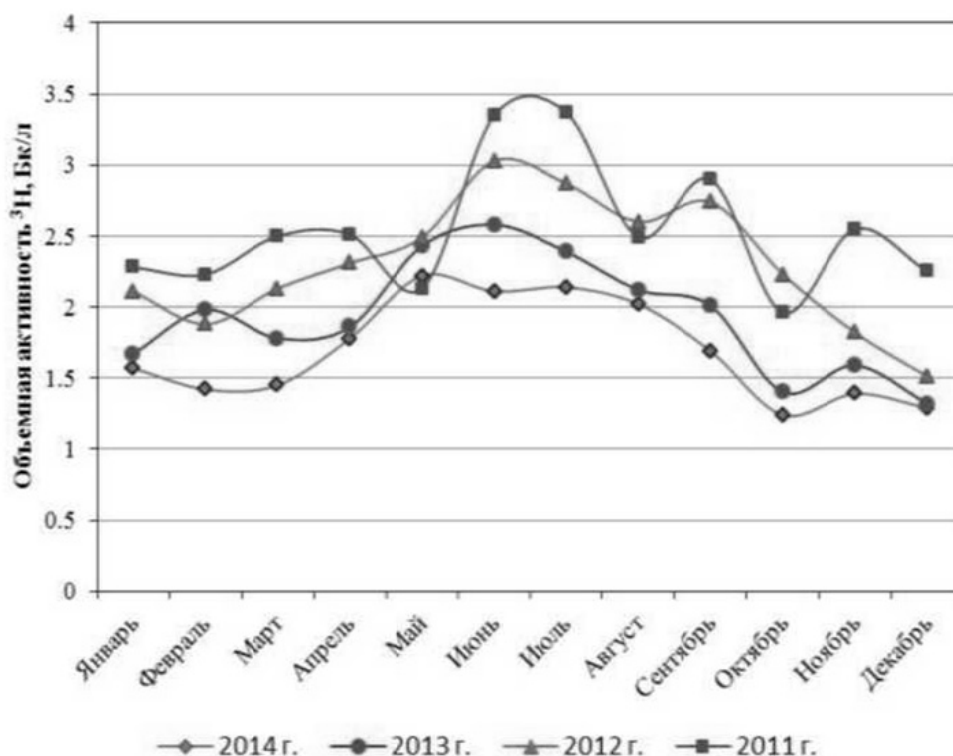


Рис. 1. Среднемесячные значения объемной активности трития в атмосферных осадках по территории РФ в 2011–2014 годах [11]

Fig. 1. Monthly average values of tritium volumetric activity in precipitation in the RF in 2011–2014 [11]

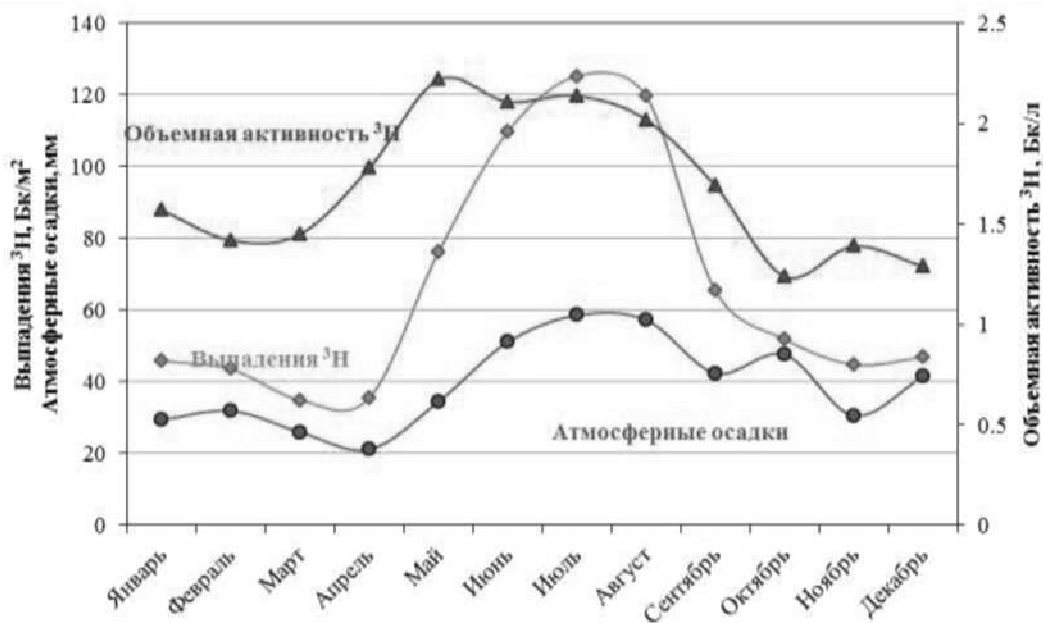


Рис. 2. Среднемесячная объемная активность трития в атмосферных осадках, среднемесячные выпадения из атмосферы и среднемесячные атмосферные осадки, осредненные по 33 пунктам на территории РФ в 2014 г. [11]

Fig. 2. Monthly average tritium volumetric activity in precipitation, monthly average tritium concentration in precipitation, and monthly average precipitation averaged by 33 parameters in the RF in 2014 [11]

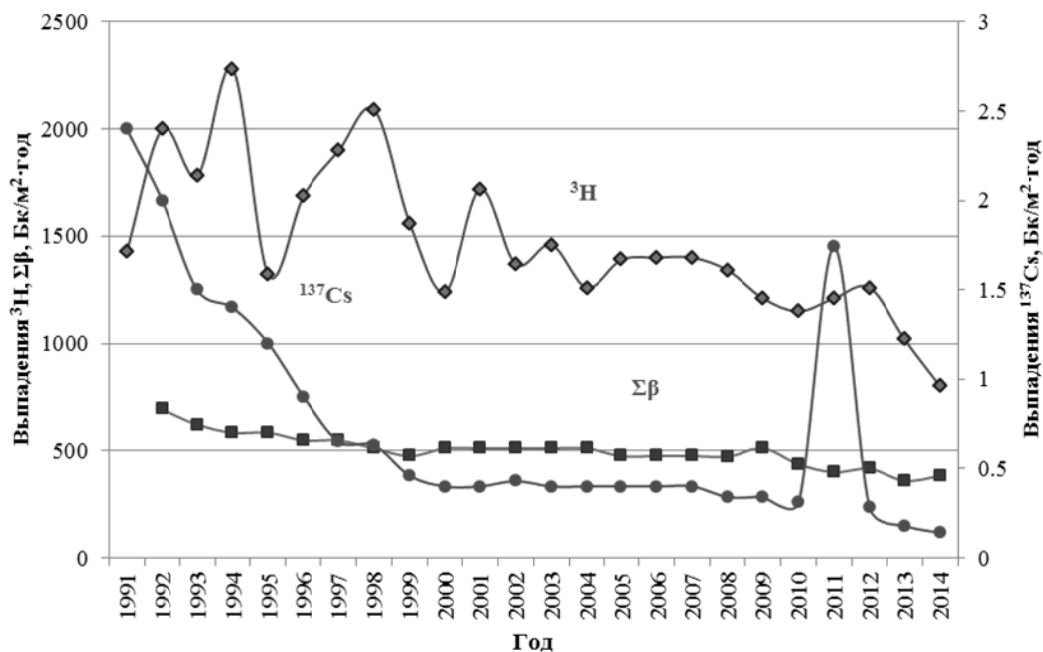


Рис. 3. Динамика выпадений радионуклидов на подстилающую поверхность и трития (с осадками) вне загрязненных зон РФ в 1991–2014 годах [11]

Fig. 3. Dynamics of radionuclide deposition on the underlying surface and tritium deposition (with precipitation) beside polluted areas in the RF in 1991–2014 [11]

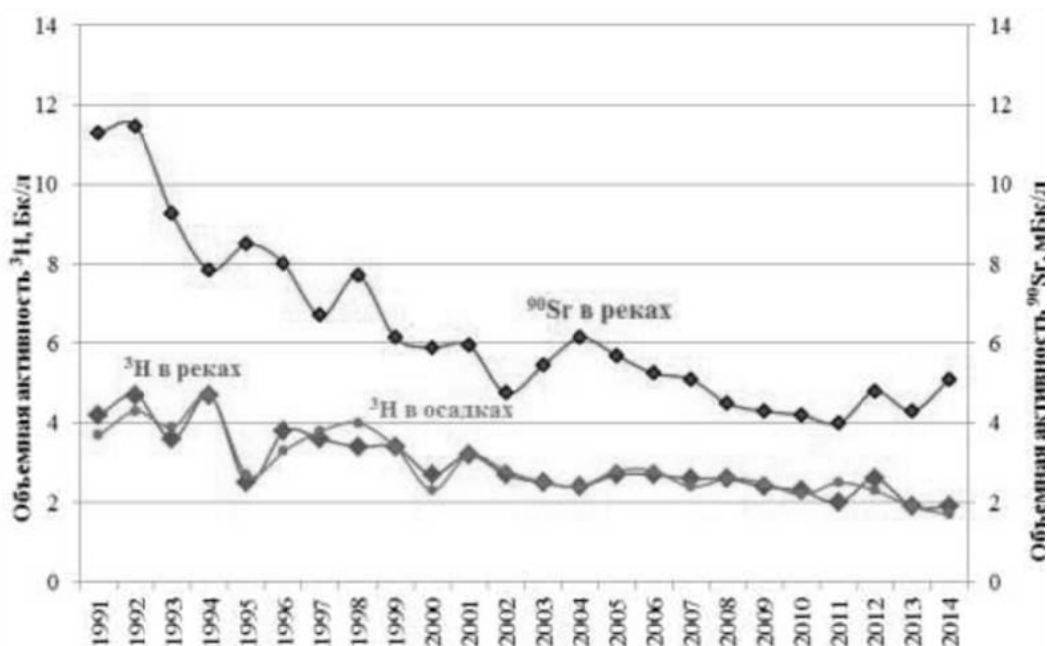


Рис. 4. Динамика объемной активности ^3H в реках и атмосферных осадках и ^{90}Sr в реках на территории РФ в 1991–2014 годах [11]

Fig. 4. Dynamics of ^3H volumetric activity in rivers and precipitation and ^{90}Sr in rivers in the RF in 1991–2014 [11]

Авария на АЭС «Фукусима-1» в 2011 г. не оказала заметного влияния на среднемесячные величины выпадений и объемной активности трития в атмосферных осадках, как и на суммарные показатели по всей территории (рис. 3). Также в 2011 г. не наблюдалось увеличения выпадения радионуклидов, определяющих суммарную β -активность, чего нельзя сказать о ^{137}Cs , количество выпадений которого в 2011 г. увеличилось более чем в 3 раза по сравнению с несколькими предыдущими годами.

Данные по активности трития в водах основных рек России и атмосферных осадках за период 1991–2014 гг. показывают, что со временем происходит уменьшение его уровня как в речной воде, так и в осадках. На рис. 4 видно, что объемная активность трития в реках коррелирует его концентрацией в атмосферных осадках. Объемная активность трития в осадках и речной воде отличалась незначительно в течение всего периода наблюдений.

Анализ результатов многолетних исследований проведенных специалистами НПО «Тайфун» показывает не только динамику к снижению активности трития в водных объектах РФ, но и то, что значения его объемной

активности в осадках и открытой гидрографической сети на 3 порядка ниже уровня вмешательства.

Характеристика основных предприятий ЯТЦ Уральского региона

В Уральском регионе расположены два основных действующих предприятия ЯТЦ – «Производственное объединение (ПО) «Маяк» и Белоярская атомная электростанция (БАЭС), которые оказывают влияние на содержание трития в окружающей среде.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Производственное объединение «Маяк» (ФГУП «ПО «Маяк») находится на севере Челябинской области в междуречье рек Теча и Мишеляк, вблизи городов Кыштым и Касли на территории Озёрского городского округа. Промышленная площадка ФГУП «ПО «Маяк» занимает площадь 256 км², граница которой совпадает с внешней границей санитарно-защитной зоны.

Датой образования предприятия принято считать 19 июня 1948 года, когда на нем был пущен первый промышленный уран-графитовый реактор. В настоящее время реакторный комплекс предприятия состоит из двух действующих промышленных реакторных установок: легководной РУСЛАН и тяжеловодной

ЛФ-2, а также пяти остановленных промышленных уран-графитовых реакторов. Назначение реакторных установок – наработка продукции военного назначения, а также радионуклидов гражданского назначения.

Одним из основных составляющих частей ядерно-оружейного комплекса предприятия является химическое производство. Уникальные технологии химического производства, низкотемпературная ректификация изотопов водорода, изготовление мелкодисперсных порошков, которыми владеет исключительно ФГУП «ПО «Маяк», позволяют выпускать продукцию, отвечающую современным требованиям. Кроме этого, здесь производят чистый ^3He , светознаки и светоэлементы [8].

Белоярская АЭС расположена в 42 км к востоку от г. Екатеринбурга на восточном берегу Белоярского водохранилища, созданного на р. Пышме в качестве водоема-охладителя, и в 3 км к северу от г. Заречный. 26 ноября 2010 г. была принята в эксплуатацию модернизированная система радиационного контроля (СРК) энергоблока № 3 БАЭС. Энергоблоки № 1 и 2 первой очереди с реакторами на тепловых нейтронах типа АМБ остановлены в 1981 и 1989 гг. соответственно и в настоящее время находятся в стадии подготовки к выводу из эксплуатации. В настоящее время на Белоярской АЭС эксплуатируется два энергоблока – БН-600 (введен в эксплуатацию в 08.04.1980 г.) и БН-800 (введен в эксплуатацию 10.12.2015 г.). Это крупнейшие в мире энергоблоки с реакторами на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем. По показателям надежности и безопасности «быстрый» реактор входит в число лучших ядерных реакторов мира.

В настоящее время рассматривается возможность дальнейшего расширения Белоярской АЭС энергоблоком № 5 с быстрым реактором мощностью 1200 МВт.

В г. Заречном расположен ОАО «Институт реакторных материалов» (ИРМ). ИРМ – один из научных ядерных центров, располагающий экспериментальной базой для исследований в области реакторного материаловедения, имеет исследовательский реактор бассейного типа ИВВ-2М мощностью 15 МВт (эксплуатируется с 1966 г.), производит радионуклиды медицинского и промышленного назначения для внутренних и зарубежных поставок. Территории ИРМ и БАЭС примыкают друг к другу [31].

Радиационная обстановка, обусловленная тритием, в районах расположения БАЭС и ПО «Маяк»

В Российской Федерации контроль за содержанием трития в объектах окружающей среды в районах расположения предприятий ЯТЦ осуществляют лаборатории отделов радиационной безопасности (ОРБ), центральными заводскими лабораториями (ЦЗЛ) предприятий и аккредитованные лаборатории сторонних предприятий и организаций.

Лаборатории проводят систематический мониторинг активности трития в открытой гидрографической сети, подземных водах, воздухе, грунте.

На содержание трития в Белоярском водохранилище оказывает влияние как БАЭС, так и ИРМ, так как стоки ИРМ и БАЭС соединяются в общий канал. Преимущественный вклад в загрязнение водоема тритием оказывает БАЭС, на что указывает динамика изменений объемной активности трития в зависимости от функционирования энергоблоков.

В период совместной работы энергоблоков № 1 и 2 БАЭС (до 1981 г.) объемная активность трития в водоеме на разных расстояниях от места сброса составляла 40–75 Бк/л [21]. После остановки энергоблока № 1 в период с 1981 по 1989 г. при совместной работе блоков № 2 и 3 средний показатель объемной активности трития составил 35–55 Бк/л. В последующее время, когда работал только энергоблок № 3, объемная активность трития в воде снизилась в 2 раза (16–26 Бк/л) (табл. 3).

Для многих предприятий ЯТЦ сброс трития в открытую гидрографическую сеть регламентирован. В табл. 4 приведены данные, показывающие количества сброса трития БАЭС с 2008 по 2013 г. Приведенные данные показывают, что уровень сброса не превышает 2 % от регламентного значения.

Сбросы трития в открытую гидрографическую сеть в 2007–2009 гг. ПО «Маяк» представлены в табл. 5.

Исследования отобранных проб воды в реках, находящихся в зоне наблюдения ПО «Маяк», выполненные специалистами НПО «Тайфун» и ЦЗЛ ПО «Маяк», показали повышенную объемную активность трития по сравнению с фоновыми значениями по РФ (см. табл. 5).

Из приведенных данных (табл. 6) видно, что объемная активность трития в воде р. Течи

Среднегодовые объемные активности трития в поверхностных водах в районе БАЭС (данные ОРБ БАЭС) [11, 12–16]

Mean annual values of tritium volumetric activities in surface waters near Belyarsk nuclear power plant (BNPP) [11, 12–16]

Водоем Water body	³ H, Бк/л ³ H, Bq/l						
	2014	2013	2012	2011	2010	2009	2008
Белоярское вдхр. (заборный канал) Belyarsk reservoir (water intake channel)	16,0	16,0	19,0	18,0	16,9	16,9	15,7
Белоярское вдхр. (устье сбросного канала) Belyarsk reservoir (opening of the outflow channel)	26,0	18,0	26,0	20,0	16,3	16,3	18,5
р. Пышма в 1 км ниже сброса (п. Шеелит) The Pyshma River, 1 km downstream from the outflow (Shehelit)	17,5	19,0	21,0	16,7	15,7	15,7	14,9
Контрольная точка – верховье Белоярского вдхр. (15 км от АЭС) Control point – Belyarsk reservoir headwaters (in 15 km from nuclear plant)	17,5	14,0	20,0	13,0	20,4	20,4	15,8
р. Пышма до водозабора The Pyshma River before water intake	16,0	11,5	18,0	–	–	–	–

Таблица 4

Table 4

Сбросы трития со сточными водами в открытую гидрографическую сеть БАЭС [12–17]
Waste-water tritium disposal to the open hydrographic network of BNPP [12–17]

³ H, Бк ³ H, bq					
2008	2009	2010	2011	2012	2013
$1,4 \cdot 10^{12}$	$8,8 \cdot 10^{11}$	$1,2 \cdot 10^{12}$	$5,0 \cdot 10^{11}$	$5,36 \cdot 10^{11}$	$4,10 \cdot 10^{11}$
Разрешенный сброс для БАЭС Permissible disposal for BNPP					
$7,7 \cdot 10^{13}$					

в период с 2006 по 2014 г. превышала фоновый уровень в реках России в отдельные годы от 50 до 200 раз, но была более чем на порядок ниже уровня вмешательства.

Таблица 5

Table 5

Сбросы трития со сточными водами в открытую гидрографическую сеть ПО «Маяк» [9, 12, 13]

Waste-water tritium disposal to the open hydrographic network of Mayak

³ H, Бк ³ H, Bq		
2007 г.	2008 г.	2009 г.
$1,55 \cdot 10^{13}$	$1,85 \cdot 10^{13}$	$1,73 \cdot 10^{13}$

По мере удаления от ПО «Маяк» объемная активность трития значительно уменьшалась от с. Муслюмово (78 км от источника) до п. Затеченское, расположенном в 237 км от источника (табл. 6).

Исследования воды, проведенные в Уральском научно-практическом центре радиационной медицины ФМБА России в 2010–2012 гг. так же показали зависимость снижения уровня активности трития от расстояния до источника. При этом самые высокие значения объемной активности трития (589 Бк/л) были в 13 раз меньше уровня вмешательства [2].

Аналогичные результаты получены Отделом континентальной радиоэкологии Института экологии растений и животных УрО РАН в 2005, 2010 гг. [23] и сотрудниками Института истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН в 2012 г. [3].

Еще одной рекой, которая находится в зоне влияния ПО «Маяк», является река Мишеляк, особенностью этой реки является то, что ее достигла линза загрязненных радионуклидами подземных вод из района оз. Карачай. Ежеквартальные измерения в четырех

точках наблюдения в период с 2007 по 2014 г. показали, что среднегодовые значения активности трития так же, как и в воде реки Теча не превышали уровня вмешательства более чем на порядок (табл. 7).

Таблица 6

Table 6

**Объемная активность трития
в водах р. Течи, Бк/л (данные ЦЗЛ ПО «Маяк»)**

**Tritium volumetric activity
in the Techa River water, Bq/l [9–17]**

Средние показатели по годам Mean values by years	с. Муслюмово Muslyumovo	п. Затеченское Zatechenskoe
2014	211	134
2013	230	144
2012	335	85
2011	260	80
2010	380	175
2009	232	95
2008	110	83
2007	103	70
2006	175	70
УВ	7600	

Таблица 7

Table 7

**Содержание трития
в водах р. Мишеляк, Бк/л (данные ЦЗЛ ПО «Маяк»)**

**Tritium concentration
in the Mishelyak River water, Bq/l [9–17]**

Средние показатели по годам Mean values by years	Контрольные точки отбора Sample control points			
	M1	M2	M3	M4
2014	132	291	135	134
2013	122	160	192	190
2012	106	170	80	215
2011	76	103	59	113
2010	105	100	92	222
2009	125	241	233	253
2008	113	117	117	104
2007	184	200	225	290
УВ	7600			

Тритий в результате деятельности предприятия ЯТЦ попадает не только в гидрографическую сеть, но и в атмосферу. Выбросы в атмосферу для каждого предприятия ограничены регламентом. Для ПО «Маяк» пределы верхних границы выбросов в атмосферу составляют величины порядка 10^{16} Бк в год. Реальные же выбросы предприятия на 1–2 порядка ниже (табл. 8).

Особый интерес представляет вопрос миграции трития из атмосферы с осадками в наземные природные объекты. ЦЗЛ ПО «Маяк» в 2013 г. проводила отбор проб снега и растительности в сфере влияния предприятия. По данным ЦЗЛ, значения удельной активности радионуклидов в снеговом покрове находились на уровне 188 Бк/кг [17].

Таблица 8

Table 8

**Выбросы трития в атмосферу
ПО «Маяк» в 2012–2014 гг. [11, 16, 17]**

**Tritium disposal to the atmosphere, Mayak,
2012–2014 [11, 16, 17]**

^3H , Бк ^3H , Bq		
2012 г.	2013 г.	2014 г.
$2,54 \cdot 10^{14}$	$2,54 \cdot 10^{14}$	$1,15 \cdot 10^{15}$
Разрешенный сброс для ПО «Маяк» Permissible disposal for Mayak		
–	$1,43 \cdot 10^{16}$	$1,96 \cdot 10^{16}$

Многолетние исследования НПО «Тайфун» среднегодовой объемной активности трития в атмосферных осадках в некоторых населенных пунктах 100-километровой зоны ПО «Маяк» приведены в табл. 8. При удалении пункта наблюдения от источника выброса трития в атмосферу снижается уровень его активности в атмосферных осадках. Уровни активности трития в данных населенных пунктах значительно превышают средний уровень по России для аналогичного показателя (табл. 9).

Исследования, проведенные непосредственно в расположении ПО «Маяк» в 2007 г., показали высокую вариабельность значений объемной активности трития в дождевых осадках от 20 до 2986 Бк/л при среднем значении 329/л, что более чем в 130 раз превысило средние значения по РФ (табл. 10) [20].

Анализ подземных вод в санитарно-защитной зоне (СЗЗ) ПО «Маяк» в 2007 г. показал, что в отдельных скважинах уровень объемной активности трития превышает уровень вмешательства. При этом отмечается тенденция к повышению объемной активности трития по мере увеличения глубины отбора проб.

При обследовании 45 питьевых источников (колодцы, скважины), находящихся в пунктах 100-километровой зоны ПО «Маяк», средняя объемная активность трития в которых составила 29 Бк/л, также отмечена зависимость объемной активности трития от глубины изучаемого объекта [22].

Среднегодовая объемная активность трития в атмосферных осадках в некоторых пунктах 100-километровой зоны ПО «Маяк» (данные НПО «Тайфун» 2003–2011 гг.) [15]
Mean annual tritium volumetric activity in precipitation in several points of Mayak 100-km area (2003–2011) [15]

Год Year	Объемная активность трития, Бк/л Tritium volumetric activity, Bq/l			
	Метлино (16 км) Metlino (16 km)	Аргаяш (23 км) Argayash (23 km)	Новогорный (8 км) Novogorny (8 km)	Касли (21 км) Kasli (21 km)
2003	–	18,5	91,9	27,4
2004	–	11,9	60,4	21,5
2005	–	19,5	108,9	21,8
2006	–	10,7	53,3	22,1
2007	–	15,8	71,4	18,2
2008	–	14,8	49,3	14,6
2009	–	–	35,0 ¹⁾	–
2010	11,4 ²⁾	4,8 ³⁾	39,1 ⁴⁾	–
2011	–	7,4	46,6	–

Примечание. Отбор проб не проводился; 1 – данные за 6 месяцев; 2 – данные за 8 месяцев; 3 – данные за 4 месяца; 4 – данные за 9 месяцев.

Note. Sample collection was not performed; 1 – 6-month data; 2 – 8-month data; 3 – 4-month data; 4 – 9-month data.

Таблица 10

Table 10

Содержание трития в подземных водах в СЗЗ ПО «Маяк» в 2007 г. (данные ЦЗЛ ПО «Маяк») [9]
Tritium concentration in ground waters of Mayak sanitary protection zone in 2007 [9]

Номер скважины Hole number	Интервал опробования, м Testing interval, m	Объемная активность, Бк/л Volumetric activity, Bq/l
217/70	40	$2 \cdot 10^5$
217/70	64	$4,6 \cdot 10^2$
227/70	40	$3,5 \cdot 10^4$
10/68	Верх	$3,3 \cdot 10^3$
10/68	40	$2,8 \cdot 10^4$
10/68	100	$7,2 \cdot 10^4$
3/68	Верх	$1,5 \cdot 10^3$
3/68	100	$2,7 \cdot 10^4$
9/68	Верх	$2,3 \cdot 10^3$
9/68	100	$1,8 \cdot 10^4$
36/70	20	$3,2 \cdot 10^4$
36/70	40	$6,5 \cdot 10^4$
36/70	60	$8,2 \cdot 10^4$

Заключение

В документе R.709 «Биологические эффекты облучения от отдельных инкорпорированных радионуклидов» НКДАР ООН отмечено, что существует ряд причин, по которым биологические эффекты трития вызывают особый интерес [1]:

– из-за низкой энергии тритий характеризуется низкой радиотоксичностью и, следовательно, регламентирующие пределы выбросов в окружающую среду достаточно высокие (обычно порядка ТБк), что вызывает опасения со стороны населения;

– тритий легко инкорпорируется в органические молекулы (в том числе ДНК), которые участвуют в обмене веществ внутри организма.

В разделе «Необходимость в дальнейших исследованиях» НКДАР ООН считает, что необходимо продолжить исследования по следующим направлениям:

1. Микрораспределение трития.
2. Относительная биологическая эффективность.

3. Исследования механизмов развития радиационноиндуцированных эффектов от инкорпорированного трития.

4. Окружающая среда.

5. Эпидемиология.

Несмотря на многочисленные системные исследования активности трития в зоне наблюдения (ЗН) ПО «Маяк» и БАЭС, современное состояние изученности распределения трития в Уральском регионе не позволяет в полной мере оценить эффект его воздействия на население проживающее в районе расположения предприятий ЯТЦ.

Необходимо продолжение мониторинга динамики изменения активности трития в объектах окружающей среды, обусловленного выбросами и сбросами предприятий ЯТЦ, а также естественными природными процессами. Слабо изученным остаётся вопрос количественного определения органических соединений трития (ОСТ) в донных отложениях водных объектов, а также в растениях, выращенных на территории ЗН предприятий ЯТЦ, которые местные жители употребляют в пищу. Необходимо создание комплексной модели перехода оксида трития (НТО) и органических соединений трития (ОСТ), из объектов окружающей среды в организм человека, с последующей верификацией данной модели на измерениях объёмной активности радионуклида в биологических образцах.

Данная работа выполнена в рамках государственного контракта № 11.311.14.10 от 4 марта 2014 года по теме «Исследование радиационного риска и актуализация нормативно-методических документов при работе с соединениями трития» (шифр: «Элемент-2»), финансируемого ФМБА России.

Литература

1. Итоги 62-й сессии научного комитета по действию атомной радиации (НКДАР) ООН / А.В. Аклеев, Т.В. Азизова, Р.М. Алексехин и др. // *Мед. радиология и радиац. безопасность*. – 2016. – Т. 61, № 1. – С. 60–72.

2. Кузнецов, В.М. Результаты первого этапа комплексного радиоэкологического обследования поймы реки Теча (Челябинская область) / В.М. Кузнецов, М.С. Хохлова, С.П. Колотухин // *Пространство и Время*. – 2013. – № 3 (13). – С. 182–189.

3. *Нормы радиационной безопасности (НРБ-96): Гигиенические нормативы ГН*

2.6.1.054-96. Госкомсанэпиднадзор России. – М., 1996.

4. *Нормы радиационной безопасности (НРБ-99) СП 2.6.1.758-99 Минздрав России*. – <http://www.gosthelp.ru/text/NRB99Normyradiacionnojbez.html>.

5. *Нормы радиационной безопасности НРБ-76/87 и основные санитарные правила ОСП-72/87*. – Изд. 3-е. – М.: Энергоатомиздат, 1987.

6. *Отчет по экологической безопасности ФГУП «ПО «Маяк» за 2014 год / Гос. корпорация по атом. энергии «Росатом», Федер. гос. унитар. предприятие «Произв. об-ние «Маяк»*. – Озёрск; Челябинск: Автограф, 2015. – 56 с.

7. *Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2007 году / под ред. С.М. Вакуловского*. – Обнинск: НПО «Тайфун», 2008. – 287 с.

8. *Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2006 году / под ред. С.М. Вакуловского*. – Обнинск: НПО «Тайфун», 2007. – 280 с.

9. *Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2014 году / под ред. С.М. Вакуловского*. – Обнинск: НПО «Тайфун», 2015. – 350 с.

10. *Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2008 году / под ред. С.М. Вакуловского*. – Обнинск: НПО «Тайфун», 2009. – 297 с.

11. *Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2009 году / под ред. С.М. Вакуловского*. – Обнинск: НПО «Тайфун», 2010. – 316 с.

12. *Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2010 году / под ред. С.М. Вакуловского*. – Обнинск: НПО «Тайфун», 2011. – 298 с.

13. *Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2011 году / под ред. С.М. Вакуловского*. – Обнинск: НПО «Тайфун», 2012. – 345 с.

14. *Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2012 году / под ред. С.М. Вакуловского*. – Обнинск: НПО «Тайфун», 2013. – 346 с.

15. *Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2013 году / под ред. С.М. Вакуловского*. – Обнинск: НПО «Тайфун», 2014. – 358 с.

16. Сазонов, А.Б. Радиационно-индуци-

- рованные газофазные реакции трития: кинетика и механизмы реакций / А.Б. Сазонов // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2013. – Т. 36. – Вып. 2. – С. 25–50.
17. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ–99/2009): Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. – М.: Федер. центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 100 с.
18. Сравнительное поведение трития и ^{137}Cs в атмосфере / К.П. Махонько, В.М. Ким, И.Ю. Катрич, А.А. Волокитин // Атомная энергия. – 1998. – Т. 85. – Вып. 4. – С. 313–318.
19. Тритий в воде колодцев и скважин района производственного объединения «Маяк» / М.Я. Чеботина, О.А. Николин, А.И. Смагин и др. // Урал. геофиз. вестник. – 2007. – № 4 (13). – С. 95–97.
20. Чеботина, М.Я. Поступление трития на земную поверхность с дождевыми осадками в районе по «Маяк» / М.Я. Чеботина, Е.К. Мурашова, А.И. Смагин // Урал. геофиз. вестник. – 2010. – № 1 (16). – С. 69–73.
21. Чеботина, М.Я. Радиозэкологические исследования трития в Уральском регионе / М.Я. Чеботина, О.А. Николин. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 90 с.
22. Чеботина, М.Я. Тритий в водной системе реки Теча / М.Я. Чеботина, О.А. Николин // Радиационная биология. Радиозэкология. – 2016. – Т. 56, № 1. – С. 102–106.
23. ^3H , ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$ в системе реки Теча / Н.Н. Казачёнок, И.Я. Попова, В.С. Мельников и др. // Вода: химия и экология. – 2013. – № 11. – С. 10–15.
24. Belot, Y. Determination of tritiated formaldehyde in effluents from tritium facilities / Y. Belot, H. Camus, T. Marini // Fusion Technology. – 1992. – Vol. 21. – P. 556–559.
25. Fairlie, Ian The hazards of tritium – revisited / Ian Fairlie // Medicine, Conflict and Survival. – Vol. 24, № 4. – 2008. – P. 306–319.
26. Fairlie, Ian Tritium Hazard Report: Pollution and Radiation Risk from Canadian Nuclear Facilities. Greenpeace Canada June 2007. – <http://www.greenpeace.org/canada/global/canada/report/2007/6/tritium-hazard-report-pollu.pdf>.
27. Garland, J.A. Transfer of tritiated water vapour to and from land surfaces in: Behaviour of Tritium in the Environment. STI/PUB/498. IAEA / J.A. Garland. – Vienna, 1979. – P. 349–359.
28. Health Effects, Dosimetry and Radiological Protection of Tritium. Part of the Tritium Studies Project. Canadian Nuclear Safety Commission. – http://www.nuclearsafety.gc.ca/pubs_catalogue/uploads/CNSC_Health_Effects_Eng-web.pdf.
29. <http://www.belnpp.rosenergoatom.ru/about/aboutStation/>.
30. Prediction of the flux of tritiated water from the air to plant leaves / Y. Belot, K. Ganthier, H. Camus et al. // Health Physics. – 1979. – Vol. 37, № 4. – P. 575.
31. Review of Risks from Tritium. Report of the independent Advisory Group on Ionising Radiation. Documents of the Health Protection Agency Radiation, Chemical and Environmental Hazards November 2007. – http://www.rachel.org/lib/tritium_risks.070601.pdf.
32. Robin, L. Metabolism and dosimetry of tritium / L. Robin, J. Hilland, R. Johnson // Health Physics. – 1993. – № 65 (6). – P. 628–647.
33. Sources and effects of ionizing radiation // United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 1993 Report. – UN, 1993. – P. 199.
34. Taeschner, M. HT dispersion and deposition in soil after experimental releases of tritiated hydrogen / M. Taeschner, B. Wiener, C. Bunnenberg // Fusion Technol. – 1988. – № 14. – P. 1264–1273.
35. Takeda, H. Biological behavior of tritium after administration of tritiated water in the rat / H. Takeda, Y. Kasida // J. Radiat. Res. – 1979. – № 20. – P. 174–185.
36. Volatile tritiated organic acids in stack effluents and in air surrounding contaminated Materials / Y. Belot, H. Camus, T. Marini, S. Raviart // J. of Fusion Energy. – 1993. – Vol. 12. – P. 71–75.

Янов Александр Юрьевич, кандидат биологических наук, заместитель директора по научной работе, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; ведущий инженер, Южно-Уральский институт биофизики, г. Озерск, yanov@subi.su.

Востротин Вадим Владимирович, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией радиационной безопасности, Южно-Уральский институт биофизики, г. Озерск, vostrotin@subi.su.

Финашов Леонид Викторович, младший научный сотрудник, Южно-Уральский институт биофизики, г. Озерск, finashov@subi.su.

Поступила в редакцию 15 апреля 2016 г.

DOI: 10.14529/hsm160209

ENVIRONMENTAL TRITIUM IN THE URAL REGION: CURRENT SITUATION AND RADIATION PROTECTION ANALYSIS OF RESEARCH PERSPECTIVES

A. Yu. Yanov^{1,2}, yanov@subi.su,
V.V. Vostrotin², vostrotin@subi.su,
L.V. Finashov², finashov@subi.su

¹South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

²Southern Urals Biophysics Institute, Ozersk, Chelyabinsk region, Russian Federation

Aim. To study current situation and prospective analysis of environmental tritium in the Ural region considering radiation protection. **Results.** Examination of water bodies, air, and population shows that for most environmental objects in the Ural region tritium volumetric activity does not exceed intervention level. However, there are natural objects with tritium volumetric activity much higher than background levels. **Conclusion.** The prospective analysis of tritium distribution in environmental objects has shown that, considering radiation protection, the most effective studies should be performed in accordance with R.709 document by the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation “Biological effects of selected internal emitters”.

Keywords: tritium, intervention level, radiation protection, organically bound tritium, nuclear fuel cycle.

References

1. Akleev A.V., Azizova T.V., Aleksakhin R.M., Ivanov V.K., Koterov A.N., Kryshev A.I., Miheenko S.G., Rachkov A.V., Romanov S.A., Sazhin A.V., Samoylov A.S., Shinkarev S.M. [The Results of the 62 th Session of the Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) United Nations]. *Meditinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost'* [Nuclear Medicine and Radiation Safety], 2016, vol. 61, no. 1, pp. 60–72. (in Russ.)
2. Kuznetsov V.M., Khokhlova M.S., Kolotukhin S.P. [The Results of the First Phase of an Integrated Radiological Survey of the Floodplain of the Techa River (Chelyabinsk Region)]. *Prostranstvo i Vremya* [Space and Time], 2013, no. 3(13), pp. 182–189. (in Russ.)
3. GN 2.6.1.054-96. *Normy radiatsionnoy bezopasnosti (NRB-96): Gigienicheskie normativy. Goskomsanepidnadzor Rossii* [Radiation Safety Standards (NRB-96). Hygienic standards. Russian State Committee]. Moscow, 1996.
4. SP 2.6.1.758-99. *Normy radiatsionnoy bezopasnosti (NRB-99) SP 2.6.1.758-99 Minzdrav Rossii* [Radiation Safety Standards (NRB-99) Russian Ministry of Health]. Available at: <http://www.gosthelp.ru/text/NRB99Normyradiacionnojbez.html>.
5. NRB-76/87. OSP-72/87. *Normy radiatsionnoy bezopasnosti. Osnovnye sanitarnye pravila* [Radiation Safety Standards. The Basic Sanitary Rules]. Moscow, Energoatomisdat Publ., 1987.
6. *Otchet po ekologicheskoy bezopasnosti FGUP “PO “Mayak” za 2014 god / Gosudarstvennaya korporatsiya po atomnoy energii “Rosatom”, Federal'noe gosudarstvennoe unitarnoe predpriyatie “Proizvodstvennoe ob'edinenie “Mayak”* [Report on the Environmental Security of the FSUE “PA “Mayak” in 2014 / The State Atomic Energy Corporation Rosatom, Federal State Unitary Enterprise Production Association Mayak]. Ozersk; Chelyabinsk, Avtograf Publ., 2015. 56 p.

7. Vakulovskiy S.M. (Ed.) *Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nykh gosudarstv V 2007 godu* [The Radiation Situation in the Territory of Russia and Neighboring Countries in 2007]. Obninsk, SPA Typhoon Publ., 2008. 287 p.

8. Vakulovskiy S.M. (Ed.) *Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nykh gosudarstv V 2006 godu* [The Radiation Situation in the Territory of Russia and Neighboring Countries in 2006]. Obninsk, SPA Typhoon Publ., 2007. 280 p.

9. Vakulovskiy S.M. (Ed.) *Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nykh gosudarstv V 2014 godu* [The Radiation Situation in the Territory of Russia and Neighboring Countries in 2014]. Obninsk, SPA Typhoon Publ., 2015. 350 p.

10. Vakulovskiy S.M. (Ed.) *Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nykh gosudarstv V 2008 godu* [The Radiation Situation in the Territory of Russia and Neighboring Countries in 2008]. Obninsk, SPA Typhoon Publ., 2009. 297 p.

11. Vakulovskiy S.M. (Ed.) *Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nykh gosudarstv V 2009 godu* [The Radiation Situation in the Territory of Russia and Neighboring Countries in 2009]. Obninsk, SPA Typhoon Publ., 2010. 316 p.

12. Vakulovskiy S.M. (Ed.) *Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nykh gosudarstv V 2010 godu* [The Radiation Situation in the Territory of Russia and Neighboring Countries in 2010]. Obninsk, SPA Typhoon Publ., 2011. 298 p.

13. Vakulovskiy S.M. (Ed.) *Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nykh gosudarstv V 2011 godu* [The Radiation Situation in the Territory of Russia and Neighboring Countries in 2011]. Obninsk, SPA Typhoon Publ., 2012. 345 p.

14. Vakulovskiy S.M. (Ed.) *Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nykh gosudarstv V 2012 godu* [The Radiation Situation in the Territory of Russia and Neighboring Countries in 2012]. Obninsk, SPA Typhoon Publ., 2013. 346 p.

15. Vakulovskiy S.M. (Ed.) *Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nykh gosudarstv V 2013 godu* [The Radiation Situation in the Territory of Russia and Neighboring Countries in 2013]. Obninsk, SPA Typhoon Publ., 2014. 358 p.

16. Sazonov A.B. [Radiation-Induced Gas Phase Tritium Reaction Kinetics and Mechanisms of Reactions]. *VANT. Ser. Termoyadernyy sintez* [PAST. Ser. Thermonuclear Fusion], 2013, vol. 36, iss. 2, pp. 25–50. (in Russ.)

17. SanPiN 2.6.1.2523-09. *Normy radiatsionnoy bezopasnosti (NRB-99/2009): Sanitarno-epidemiologicheskie pravila i normativy* [Radiation Safety Standards (NRB-99/2009). Sanitary-Epidemiological Rules and Norms]. Moscow, Federal Center of Hygiene and Epidemiology Publ., 2009. 100 p.

18. Makhon'ko K.P., Kim V.M., Katrich I.Ju., Volokitin A.A. [Comparative Behavior of Tritium and ^{137}Cs in the Atmosphere]. *Atomnaya energiya* [Nuclear Power], 1998, vol. 85, iss. 4, pp. 313–318. (in Russ.)

19. Chebotina M.Ya., Nikolin O.A., Smagin A.I., Murashova E.K., Rybakov E.N. [Tritium in Water Wells and Boreholes District Production Association Mayak]. *Ural'skiy geofizicheskiy vestnik* [Ural Geophysical Bulletin], 2007, no. 4 (13), pp. 95–97. (in Russ.)

20. Chebotina M.Ya., Murashova E.K., Smagin A.I. [Receipt of Tritium on Earth's Surface from Rainfall in the Region by Mayak]. *Ural'skiy geofizicheskiy vestnik* [Ural Geophysical Bulletin], 2010, no. 1 (16), pp. 69–73. (in Russ.)

21. Chebotina M.Ya., Nikolin O.A. *Radioekologicheskie issledovaniya tritiya v Ural'skom regione* [Radiological Studies of Tritium in the Urals]. Ekaterinburg, Ural Branch of Russian Academy of Sciences Publ., 2005. 90 p.

22. Chebotina M.Ya., Nikolin O.A. [Tritium in the Water System Techa]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya* [Radiation Biology. Radioecology], 2016, vol. 56, no. 1, pp. 102–106. (in Russ.)

23. Kazachenok N.N., Popova I. Ya., Mel'nikov V.S., Polyanchikova G.V., Tikhova Yu.P., Konovalov K.G., Kopelov A.I. [^3H , ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$ System Techa]. *Voda: khimiya i ekologiya* [Water. Chemistry and Ecology], 2013, no. 11, pp. 10–15. (in Russ.)

24. Belot Y., Camus H., Marini T. Determination of Tritiated Formaldehyde in Effluents From Tritium Facilities. *Fusion Technology*, 1992, vol. 21. pp. 556–559.

25. Fairlie I. The Hazards of Tritium – Revisited. *Medicine, Conflict and Survival*, 2008, vol. 24, no. 4, pp. 306–319. DOI: 10.1080/13623690802374239
26. Fairlie I. Tritium Hazard Report: Pollution and Radiation Risk From Canadian Nuclear Facilities. Greenpeace Canada June 2007. Available at: <http://www.greenpeace.org/canada/global/canada/report/2007/6/tritium-hazard-report-pollu.pdf>.
27. Garland J.A. Transfer of Tritiated Water Vapour to and From Land Surfaces in: Behaviour of Tritium in the Environment. STI/PUB/498. IAEA. Vienna, 1979. pp. 349–359.
28. Health Effects, Dosimetry and Radiological Protection of Tritium. Part of the Tritium Studies Project. Canadian Nuclear Safety Commission. Available at: http://www.nuclearsafety.gc.ca/pubs_catalogue/uploads/CNSC_Health_Effects_Eng-web.pdf.
29. <http://www.belnpp.rosenergoatom.ru/about/aboutStation/>.
30. Belot Y., Ganthier K., Camus H. Prediction of the Flux of Tritiated Water From the Air to Plant Leaves. *Health Physics*, 1979, vol. 37, no. 4, p. 575.
31. Review of Risks From Tritium. Report of the Independent Advisory Group on Ionising Radiation. Documents of the Health Protection Agency Radiation, Chemical and Environmental Hazards November 2007. Available at: http://www.rachel.org/lib/tritium_risks.070601.pdf.
32. Robin L., Hilland J., Johnson R. Metabolism and Dosimetry of Tritium. *Health Physics*, 1993, no. 65 (6), pp. 628–647.
33. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 1993 Report. UN, 1993. p. 199.
34. Taeschner M., Wiener B., Bunnenberg C. HT Dispersion and Deposition in Soil After Experimental Releases of Tritiated Hydrogen. *Fusion Technol.*, 1988, no. 14, pp. 1264–1273.
35. Takeda H., Kasida Y. Biological Behavior of Tritium After Administration of Tritiated Water in the Rat. *J. Radiat. Res.*, 1979, no. 20, pp. 174–185. DOI: 10.1269/jrr.20.174
36. Belot Y., Camus H., Marini T., Raviart S. Volatile Tritiated Organic Acids in Stack Effluents and in Air Surrounding Contaminated Materials. *J. of Fusion Energy*, 1993, vol. 12, pp. 71–75. DOI: 10.1007/BF01059358

Received 15 April 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Янов, А.Ю. Тритий в окружающей среде Уральского региона: обзор современного состояния и анализ перспектив изучения с позиций радиологической защиты / А.Ю. Янов, В.В. Востротин, Л.В. Финашов // Человек. Спорт. Медицина. – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 85–99. DOI: 10.14529/hsm160209

FOR CITATION

Yanov A.Yu., Vostrotin V.V., Finashov L.V. Environmental Tritium in the Ural Region: Current Situation and Radiation Protection Analysis of Research Perspectives. *Human. Sport. Medicine*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 85–99. (in Russ.) DOI: 10.14529/hsm160209