

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

DOI: <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2021-61-9-605-610>

УДК 614.76

© Коллектив авторов, 2021

Барчуков В.Г., Кочетков О.А., Кабанов Д.И., Максимов А.А., Кузнецова Л.И., Еремина Н.А., Березин С.В.

Оценка содержания трития и его соединений в грунте и растительности в регионе АЭС с реакторами типа ВВЭР

ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации — Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна» ФМБА России, ул. Живописная, 46, Москва, Россия, 123098

При оценке воздействия радиационно опасных объектов на окружающую среду и человека в настоящее время большое внимание уделяется поступлению трития и его соединений. Следует отметить, что на данный момент не существует приемлемых промышленных технологий для эффективного улавливания этого радионуклида, поэтому весь тритий, образующийся при работе атомных энергетических установок, с выбросами и сбросами поступает в окружающую среду. Это приводит к увеличению его концентрации в объектах окружающей среды, в том числе в грунте и растительности. Этот факт определяет необходимость оценки его содержания в грунте и растительности.

Цель исследования — разработка метода определения содержания трития в грунте и растительности.

Для разработки методики оценки содержания трития в грунте и растительности был использован метод подготовки счетных образцов на основе сжигания отобранных проб в специализированной печи *Pyrolyser 6-Trio*. Предварительно был проведен ряд лабораторных исследований, позволяющих оценить приемлемость этого способа пробоподготовки. Подготовленные таким образом счетные образцы были измерены на жидкостном сцинтилляционном счетчике *Tri-Carb 3180 TR/SL*.

Разработана и аттестована методика определения трития в грунте и растительности. На основе комплексной оценки содержания трития и его соединений исследовано содержание трития и его соединений в окружающей среде в районе расположения АЭС.

Показано содержание трития в грунте и растительности в населенных пунктах, расположенных вблизи АЭС с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР). Основными путями поступления трития и его соединений в растительность является воздушный путь и поступление трития из грунта. Представленные данные определяют необходимость проведения системных исследований по накоплению трития в объектах окружающей среды.

Ключевые слова: почва; растительность; воздух; вода; тритий; оксид трития; удельная активность; реактор типа ВВЭР

Для цитирования: Барчуков В.Г., Кочетков О.А., Кабанов Д.И., Максимов А.А., Кузнецова Л.И., Еремина Н.А., Березин С.В. Оценка содержания трития и его соединений в грунте и растительности в регионе АЭС с реакторами типа ВВЭР. *Мед. труда и пром. экол.* 2021; 61(9): 605–610. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2021-61-9-605-610>

Для корреспонденции: Барчуков Валерий Гаврилович, зав. лабораторией, д-р мед. наук, профессор. E-mail: barchval@yandex.ru

Участие авторов:

Барчуков В.Г., Кочетков О.А. — концепция и дизайн исследования;

Кабанов Д.И., Максимов А.А., Еремина Н.А. — сбор и обработка данных;

Кузнецова Л.И., Еремина Н.А., Максимов А.А. — написание текста;

Барчуков В.Г., Максимов А.А. — редактирование.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Дата поступления: 30.07.2021 / Дата принятия к печати: 08.10.2021 / Дата публикации: 20.10.2021

Valery G. Barchukov, Oleg A. Kochetkov, Dmitry I. Kabanov, Aleksei A. Maksimov, Larisa I. Kuznetsova, Natalya A. Eremina, Sergey V. Berezin

Assessment of the content of tritium and its compounds in soil and vegetation in the region of nuclear power plants with VVER type reactors

A.I. Burnasyan Medical Biophysical Center, 46, Zhivopisnaya str., Moscow, Russia, 123182

Currently, scientists pay great attention to the intake of tritium and its compounds when assessing the impact of radiation-hazardous objects on the environment and humans. Now, there are no acceptable industrial technologies for the effective capture of this radionuclide; therefore, all tritium generated during the operation of nuclear power plants enters the environment with emissions and discharges. Consequently, it leads to an increase in its concentration in environmental objects, including soil and vegetation. This fact determines the need to assess its content in the ground and vegetation.

The study aims to develop a method for determining the content of tritium in soil and vegetation.

To develop a methodology for assessing the content of tritium in soil and vegetation, we used the technique of preparing counting samples based on burning the selected examples in a specialized *Pyrolyser 6-Trio* furnace.

Previously, scientists conducted some laboratory studies to assess the acceptability of this method of sample preparation. We measured the counting samples on a *Tri-CARB 3180 TR/SL* liquid scintillation meter.

Scientists have developed and certified a method for determining tritium in soil and vegetation. Furthermore, we investigated the content of tritium and its compounds in the environment in the area of the Nuclear Power Plant based on a comprehensive assessment.

Researchers found tritium content in soil and vegetation in settlements near nuclear power plants with VVER type reactors. The main routes of entry of tritium and its compounds into vegetation are the air path and the access of tritium from the ground. The presented data determine the need for systematic studies on the accumulation of tritium in environmental objects.

Keywords: soil; vegetation; air; water; tritium; tritium oxide; specific activity; VVER type reactor

For citation: Barchukov V.G., Kochetkov O.A., Kabanov D.I., Maksimov A.A., Kuznetsova L.I., Eremina N.A., Berezin S.V. Assessment of the content of tritium and its compounds in soil and vegetation in the region of nuclear power plants with reactors of the type VVER. *Med. truda i prom. ekol.* 2021; 61(9): 605–610. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2021-61-9-605-610>

For correspondence: Valery G. Barchukov, the Head of laboratory, Dr. of Sci. (Med.), professor. E-mail: barchval@yandex.ru

Contribution:

Barchukov V.G., Kochetkov O.A.

— research concept and design;

Kabanov D.I., Maksimov A.A., Eremina N.A.

— data collection and processing;

Kuznetsova L.I., Eremina N.A., Maksimov A.A.

— writing the text;

Barchukov V.G., Maksimov A.A.

— editing.

Funding. The study had no funding.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

Received: 30.07.2021 / Accepted: 08.10.2021 / Published: 20.10.2021

При оценке воздействия радиационно опасных объектов на окружающую среду и человека в настоящее время большое внимание уделяется тритию и его соединениям. Актуальность проблемы обусловлена тем, что, с одной стороны, тритий является естественным радионуклидом, который присутствует в окружающей среде, с другой стороны, по мере развития атомной промышленности и энергетики его содержание в окружающей среде существенно возросло [1]. Причём, если в середине 50-х — начале 60-х годов XX столетия выброс трития в окружающую среду был обусловлен наземными испытаниями ядерного оружия, то сегодня его основным промышленным источником являются атомные станции (АЭС). Проблемы образования трития актуальны как при эксплуатации легководных реакторов типа PWR и водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР) [2], так и при эксплуатации тяжёловодных реакторов типа CANDU [3]. При этом в настоящее время не существует дешёвых промышленных технологий для эффективного улавливания данного радионуклида. Весь тритий, образующийся при работе атомных энергетических установок, с выбросами и сбросами поступает в окружающую среду, что приводит к увеличению его концентрации в объектах окружающей среды, в том числе и в грунте. Важность тритиевой проблемы для атомной энергетики подтверждает наличие отдельного документа [4], посвящённого обращению с отходами, содержащими этот радионуклид. В данном документе особо отмечено такое свойство трития, как сложность детектирования и анализа его содержания в различных средах.

И если поведение соединений трития в воздухе и водных объектах достаточно хорошо изучено, то о его поведении в почве и растительности на данный момент известно немного. Большая доля оксида трития, поступившего в почву, повторно выбрасывается в атмосферу в процессе испарения, часть его поглощается корнями растений, и небольшая часть его очень быстро мигрирует в подстилающие горизонты почвы [5, 6]. Также тритий, попав в почву, способен встраиваться в состав органических соединений, например, гуминовых и фульвокислот [7]. Тритий в виде оксида очень легко поглощается растениями, посредством обменных процессов в атмосфере в случае переноса в листву и в почве в случае переноса в корневую систему. Поглощение листвой происходит через устьице и, следовательно, связано с индексом поверхности листвы, который, в свою очередь, коррелирует с интенсивностью фотосинтеза [8]. Благодаря интенсивным обменным процессам между растительностью и почвой активность трития в листве, как правило, ниже его активности в атмосфере [9, 10]. Механизмы, посредством которых тритий внедряется в органическую материю растения, обуславливают разное время нахождения трития в различных

его органах. Наше понимание этих механизмов остаётся фрагментарным.

В настоящее время нет устоявшегося мнения и о том, как изменяется содержание соединений трития в грунте и растительности [11]. Для решения этого вопроса актуальным является наличие соответствующего методического аппарата.

Цель исследования — разработка метода определения содержания трития в грунте и растительности и проведение на её основе натурных исследований.

В настоящее время для проведения эффективного санитарно-эпидемиологического надзора за содержанием трития и его соединений в воздухе и в воде разработан и аттестован ряд методик [12, 13]. Однако до настоящего времени остается открытым вопрос о наличии аттестованной методики определения трития и его соединений в грунте и растительности.

Основная проблема при разработке подобной методики состоит в пробоподготовке счётного образца, т. е. извлечении трития и его соединений из грунта и растительности и переводе его в жидкую фазу. Существует несколько способов извлечения трития и его соединений из грунта и растительности. Одним из наиболее ранних является метод, основанный на принципе вываривания радионуклидов (трита) из почвы и растительности. Принципиальной особенностью этого подхода является то, что, кроме НТО, измеряются растворимые в воде органические соединения трития. При этом определение трития основано на переводе данного нуклида в растворенное состояние путём кипячения 1 кг почвы или 1 кг растений в скороварке (для сокращения времени кипячения) с 1 л фоновой воды [14] (водопроводной, дистиллированной или деионизированной).

Несмотря на очевидную простоту, этот метод имеет ряд недостатков. В частности, он требует много времени для исследования и наличия больших объёмов анализируемого материала. Однако самым важным его недостатком является то, что в воду экстрагируются только растворимые органические соединения трития, а соединения, встроенные в структуру мембран или органелл клетки, не экстрагируются, поэтому они не попадают в счётный образец. Таким образом, часть трития не учитывается. А если таких соединений в пробе много, то погрешность полученных результатов становится очень значимой.

В последнее время широкую популярность приобрёл метод подготовки счётного образца с помощью сжигания отобранной пробы в специальном устройстве. Несомненным преимуществом этого метода является небольшой объём исследуемой пробы, относительно быстрый процесс получения материала для счётного образца и, что наиболее существенно, окисление всех соединений три-

тия, имеющихся в пробе, до оксида трития. Таким образом, в данном методе удаётся установить полное содержание трития в пробе при относительно низкой погрешности получаемых результатов.

Для разработки методики оценки содержания трития в грунте и растительности нами был принят второй вариант пробоподготовки, как наиболее точно позволяющий определить содержание соединений трития в грунте и растительности. В настоящее время в качестве оборудования для сжигания проб наиболее широко используют специализированные печи, в частности, *Sample Oxidizer 307* (PerkinElmer, США) и *Pyrolyser Trio™* (Великобритания).

В отличие от *Sample Oxidizer 307*, в конструкции прибора *Pyrolyser Trio™* особое внимание уделено обеспечению точности и возможности учитывать особенности исследуемой пробы с помощью регулирования параметров её сжигания, массы навески пробы, скорости нагрева и выбора встроенных режимов для подготовки проб различных образцов (растительность, грунт и т. д.). Данный метод пробоподготовки, по данным производителя прибора [15], позволяет улавливать до 95% трития в твёрдой пробе.

Принцип работы *Pyrolyser Trio™* заключается в том, что пробы помещаются в лодочки из кварцевого стекла, которые затем перемещаются внутри кварцевой трубки в центр зоны подачи пробы. На трубку устанавливается заглушка из боросиликатного стекла, а к противоположному концу трубки зоны каталитического разложения присоединяется одна или две барботерные ловушки с 20 мл 0,1 М раствора HNO_3 . Воздух пропускается через пробу, которая постепенно нагревается до максимальной температуры в соответствии с запрограммированным профилем нагрева. В зоне каталитического разложения продукты сгорания пробы пропускаются через глинозёмный катализатор с платиновым покрытием, нагретым до 800°C, при этом все ионы трития окисляются до оксида трития, который осаждается в ловушках с азотной кислотой. Из полученных в ловушках растворов готовят счётные образцы, которые измеряют на жидкостном сцинтилляционном счётчике *Tri Carb 3180 TR/SL* [16], после чего рассчитывают активность трития на 1 кг пробы (почвы или растительности).

Для оценки возможности использования специализированной печи *Pyrolyser-6 Trio™* с целью проведения пробоподготовки счётных образцов при определении содержания соединений трития в грунте и растительности был проведён ряд лабораторных исследований, позволяющих оценить приемлемость этого способа пробоподготовки. Для проведения исследований была взята почва из чистой зоны, где содержание соединений трития соответствовало естественному фону. Из взятого грунта было выделено 3 образца по 750 г каждый. Из стандартного образца оксида трития (производитель ФГУП «ВНИИФТРИ») были приготовлены три пробы объёмом 100 мл каждая с активностями оксида трития $7,3 \cdot 10^3$ Бк, $3,7 \cdot 10^3$ Бк и 74 Бк. После чего каждая проба была тщательно размешана в пробе грунта. Таким образом, были получены образцы грунта с удельной активностью $8,6 \cdot 10^3$ Бк/кг, $4,4 \cdot 10^2$ Бк/кг и 87 Бк/кг. Полученная смесь оксида трития и грунта для обеспечения возможного обмена трития с водородом в приготовленных пробах была выдержана в тёмном месте в герметичных стеклянных банках в течение недели. В полученных пробах была исследована активность соединений трития в грунте путём сжигания этого грунта в печи

Pyrolyser Trio™. Из каждой пробы (смесь оксида трития и грунта) для оценки повторяемости получаемых результатов было приготовлено по 16 навесок. Процедура сжигания и приготовления счётных образцов была выполнена в соответствии с рекомендациями производителя печи *Pyrolyser Trio™* [15].

Для оценки возможности использования этого способа пробоподготовки для измерения трития в растительности, также как в предыдущем исследовании, были подготовлены два образца грунта. В этот грунт был посажен лук, где содержание оксида трития соответствовало естественному фону. Из стандартного образца оксида трития были приготовлены две пробы объёмом 100 мл каждая с активностями оксида трития 410 Бк и 76 Бк, соответственно. За время выращивания лука до зелёного пера (полив произведён 6 раз по 100 мл в течение 12 дней) в первый образец грунта было добавлено во время полива 2460 Бк оксида трития. Во второй образец грунта было добавлено во время полива 456 Бк оксида трития. По прошествии 12 дней из каждой партии было взято по 16 проб пера лука и, также как в экспериментах с грунтом, осуществлена пробоподготовка путём их сжигания в печи *Pyrolyser Trio™*.

Подготовленные таким образом счётные образцы были измерены на жидкостном сцинтилляционном счётчике *Tri-Carb 3180 TR/SL* [16]. Данная методология подготовки и измерения счётных образцов была положена в основу процедуры аттестации методики.

Разработанная «Методика определения удельной активности соединений трития в грунте и растительности» была аттестована [17]. Значения метрологических характеристик разработанной методики представлены в **таблице 1**.

Таблица 1 / Table 1
Значения метрологических характеристик методики определения удельной активности соединений трития в грунте и растительности
Values of metrological characteristics of the methodology for determining the specific activity of tritium compounds in soil and vegetation

Метрологические характеристики, ($P=0,95\%$)	Для оксида трития в грунте	Для оксида трития в растительности
Показатель повторяемости (относительное среднеквадратическое отклонение повторяемости), σ_r	9	11
Предел повторяемости, r	30	36
Показатель воспроизводимости (относительное среднеквадратическое отклонение воспроизводимости), σ_R	14	16
Предел воспроизводимости, R	39	44
Показатель точности, $\pm\delta$	19	23
Расширенная неопределённость ($k=2$), U_p	22	26

Имея методику пробоподготовки почвы и растительности для исследования содержания соединений трития, представлялось актуальным исследовать эти объекты в реальных условиях и понять закономерности накопления трития в почве и растительности. Как отмечено выше, в

настоящее время основными источниками поступления трития в окружающую среду являются АЭС, поэтому нами для исследования были выбраны корнеплоды растений, выращенные в населённых пунктах, расположенных вблизи АЭС с реакторами ВВЭР-1000, в частности, возле Балаковской и Калининской АЭС. Картофель был взят с тем расчётом, чтобы оценить максимальную возможность переноса трития из почвы в наиболее часто потребляемые населением продукты питания, которые, как правило, выращиваются в местных условиях. Для измерения содержания трития необходимо соблюдать особую осторожность при взятии проб, чтобы гарантировать равновесие между тритием и окружающей средой [18], что учитывалось при отборе проб. Отбор растительности осуществляли в соответствии с [19].

Пробоподготовку образцов осуществляли в соответствии с описанной выше процедурой. Подготовленные счётные образцы выдерживали в тёмном месте в течение 12 часов для гашения фотолюминесценции, вызванной манипуляциями с пробой. Через 12 часов подготовленные счётные образцы измеряли на жидкосцинтилляционном счётчике Tri-Carb 3180 TR/SL в соответствии с руководством пользователя [16]. Полученные результаты представлены в **таблице 2**.

Таблица 2 / Table 2

Удельная активность соединений трития в картофеле, выращенном в населённых пунктах вблизи Балаковской АЭС

Specific activity of tritium compounds in potatoes grown in settlements around Balakovskaya NPP

Населенный пункт	Проба (№=5)	Удельная активность образца ($M \pm \sigma$), Бк/кг
д. Натальино	Картофель	340±70
г. Балаково	Картофель	350±70
д. Матвеевка	Картофель	370±50
д. Широкий Буерак	Картофель	410±14

Примечание: МДА=5 Бк/кг

Note: MDA=5 Bq/kg

Данные, представленные в **таблице 2**, свидетельствуют о том, что существенной разницы в содержании соединений трития в картофеле, выращенном в населённых пунктах вблизи Балаковской АЭС, нет, однако в п. Широкий Буерак отмечается наибольшее их содержание.

В качестве сравнения аналогичные исследования были проведены на Калининской АЭС. Следует отметить, что эти станции по типу и количеству реакторов идентичны и различаются только технологиями обращения с дебалансными водами. Полученные результаты представлены в **таблице 3**.

Из полученных данных видно, что содержание соединений трития в картофеле, выращенном в населённых пунктах в районе Калининской АЭС, находится на уровне, меньшем МДА, за исключением картофеля, выращенного в д. Мишнево и д. Еремково. В картофеле, выращенном в этих населённых пунктах, содержание соединений трития оказалось сопоставимым с таковым для района Балаковской АЭС.

Для того чтобы понять, за счёт чего идёт накопление соединений трития в картофеле, нами были исследованы факторы, влияющие на накопление трития в овощах. Для этого было исследовано содержание соединений трития в

Таблица 3 / Table 3

Удельная активность соединений трития в клубнях картофеля, выращенных в населённых пунктах вблизи Калининской АЭС

Specific activity of tritium compounds in potato tubers grown in settlements around Kalininskaya NPP

Населенный пункт	Проба (№=5)	Удельная активность образца ($M \pm \sigma$), Бк/кг
д. Ряд	Картофель	< МДА
г. Удомля	Картофель	< МДА
д. Лайково-Попово	Картофель	< МДА
д. Мишнево	Картофель	340±50
д. Еремково	Картофель	240±30

Примечание: МДА=5 Бк/кг

Note: MDA=5 Bq/kg

почве, воде и воздухе. С этой целью в населённых пунктах вблизи Калининской АЭС были взяты образцы почвы по методике, описанной выше. Результаты измерений представлены в **таблице 4**.

Таблица 4 / Table 4

Удельная активность соединений трития в почве, взятой в населённых пунктах вблизи Калининской АЭС

Specific activity of tritium compounds in soil taken from settlements around Kalininskaya NPP

Место отбора	Проба (№=5)	Удельная активность образца ($M \pm \sigma$), Бк/кг
д. Ряд	Почва	< МДА
АЭС, на выезде в сторону г. Удомля	Почва	< МДА
д. Мишнево	Почва	120±14
д. Еремково	Почва	150±21

Примечание: МДА=5 Бк/кг

Note: MDA=5 Bq/kg

Из представленных данных видно, что содержание трития в почве вблизи Калининской АЭС меньше МДА. В д. Мишнево и д. Еремково, где в клубнях картофеля было определено содержание соединений трития 340 и 240 Бк/кг, соответственно, в почве содержание соединений трития составляет 120 и 150 Бк/кг соответственно. Эти данные свидетельствуют о том, что почва может быть источником поступления соединений трития в клубни картофеля.

Для оценки возможности поступления трития в картофель также исследовали два других возможных пути: грунтовые воды и воздух. С этой целью был осуществлён отбор проб воды из поверхностных источников в населённых пунктах, расположенных в районе Калининской АЭС, а также в озере Песьво. Было установлено, что во всех пробах грунтовых вод, а также в образцах воды взятых из озера Кубыча содержание трития было меньше МДА, а в озёрах Песьво и Удомля 10 Бк/л и 7,2 Бк/л соответственно. Оценку содержания соединений трития в воде проводили в соответствии с методикой [13].

Для установления возможности поступления трития в растения из воздуха было определено содержание трития и его соединений в воздухе населённых пунктов, где осуществлялся отбор проб картофеля. При этом отбор проб осуществлялся двумя методами: путём сбора конден-

сата влаги воздуха с использованием бытового осушителя воздуха *Ballu BDH-1SL* [12] и с помощью аттестованного расходомера-пробоотборника трития и его соединений из воздуха *TASC HT НТО С14* [20].

В устройстве расходомера-пробоотборника отбор трития и его соединений осуществляется за счёт прокачки воздуха через виалу (барботирование), где собирается оксид трития и его органические соединения. При этом газообразные соединения трития поступают в печь на окисление, и образовавшийся оксид трития поступает во вторую виалу. Результаты исследований представлены в *таблице 5*.

Таблица 5 / Table 5

Удельная активность соединений трития в воздухе, отобранном в населенных пунктах вблизи Калининской АЭС, где был осуществлен отбор проб картофеля
Specific activity of tritium compounds in air sampled in settlements around Kalininskaya NPP, (implementation of potato sampling)

№ п/п	Населенный пункт	Способ отбора пробы	Удельная активность образца, Бк/м ³
1	д. Ряд	барботирование	< МДА
		конденсация	0,2
2	г. Удомля	барботирование	< МДА
		конденсация	0,2
3	д. Мишнево	конденсация	1,8
4	д. Еремково	барботирование	< МДА
		конденсация	0,2

Примечание: МДА=0,1 Бк/м³

Note: MDA=0.1 Bq/m³

Из представленных данных видно, что в воздухе населённых пунктов, расположенных в районе Калининской АЭС, где осуществлялся отбор проб картофеля, содержание трития и его соединений находится по данным полученным расходомером-пробоотборником трития и его соединений из воздуха *TASC HT НТО С14* ниже МДА, а методом конденсации на границе МДА.

Обобщая данные, полученные при исследовании окружающей среды в районе расположения Балаковской и Калининской АЭС, можно заключить, что удельная активность соединений трития в картофеле, выращенном в населённых пунктах: д. Матвеевка, д. Натальино, г. Балаково, д. Широкий Буерак, расположенных вокруг Балаковской АЭС находится на уровне 350 Бк/кг. В населённых пунктах: д. Мишнево и д. Еремково расположенных вокруг Калининской АЭС, удельная активность трития составила в среднем 340 Бк/кг и 240 Бк/кг, соответственно. При этом следует отметить, что удельная активность трития в

почве в д. Мишнево и д. Еремково составила 120 Бк/кг и 150 Бк/кг соответственно. Таким образом, можно предположить, что одним из возможных путей поступления трития в картофель является почва.

О возможной роли поступления трития в картофель воздушным путём свидетельствуют и данные, полученные при исследовании образцов картофеля, выращенных в населённых пунктах, расположенных в ближайшем окружении Балаковской АЭС. Наименьшее содержание соединений трития отмечено в картофеле, выращенном в д. Натальино, а наибольшее — в п. Широкий Буерак (*табл. 2*). При сравнении этих результатов с результатами оценки содержания соединений трития в воздухе этих населённых пунктов, описанными нами ранее [21], видно, что объёмная активность трития и его соединений в воздухе в д. Натальино и п. Широкий Буерак была примерно одинакова и составляла 5,2 Бк/м³ и 5,1 Бк/м³, соответственно. Однако при этом соотношение НТ:НТО:ОСТ в д. Натальино составило 88:6:6, в п. Широкий Буерак — 14:63:23. При этом следует отметить, что д. Натальино находится в 5 км, а п. Широкий Буерак — в 12 км от станции. Причём п. Широкий Буерак находится на противоположном от АЭС берегу р. Волга. Как известно [8], растения газообразный тритий практически не поглощают, а в виде оксида поглощают очень эффективно. Вследствие того, что в воздухе п. Широкий Буерак преобладал тритий в виде оксида, а в д. Натальино — в газообразном виде, этим можно объяснить и разницу в содержании соединений трития, в картофеле, выращенном в этих населённых пунктах (410 Бк/кг и 340 Бк/кг соответственно).

Выводы:

1. В ходе проведения исследований по оценке содержания трития и его соединений в грунте и растительности в регионах АЭС с реакторами типа ВВЭР была разработана и метрологически аттестована методика определения удельной активности соединений трития в грунте и растительности.

2. Разработанная методика определения трития и его соединений в грунте и растительности может быть использована при проведении радиационного контроля за содержанием трития и его соединений в районе расположения объектов атомной промышленности.

3. Одним из путей поступления трития в овощи (картофель), выращенные в населённых пунктах, расположенных рядом с АЭС, является почва, на которой они выращены. Также определённый вклад вносит и воздушный путь, где оксидная форма играет ведущую роль. На основе полученных результатов можно предположить, что большое влияние в воздушный путь поступления оказывает наличие водоёмов и перенос факела выбросов со станции над их поверхностью.

Список литературы

- Jacobs D.G. *Sources of tritium and its behavior upon release to the environment*. United States: AEC Critical Review Series; 1968.
- Simek D., Dubsek F. Tritium in liquid releases of nuclear power plants with VVER and PWR reactors and some ways to solutions of its reduction. In: *International symposium on safety and reliability systems of PWRs and VVERs*, Brno, May 26–30, 1997. Brno; 1997.
- Simionov V., Chitu C. Internal Exposure at Cernavoda NPP. In: *2008 ISOE International symposium, Tsuruga, November 13–14, 2008*. Tsuruga; 2008.
- Management of Waste Containing Tritium and Carbon-14, Technical Reports Series No. 421. Vienna: IAEA; 2004.
- Choi Y.H., Kim S.B., Lim K.M., Park H.K., Lee W.Y. Incorporation into organically bound tritium and the underground distribution of HTO applied to a simulated rice field. *J Environ Radioactiv*. 2000; 47: 279–90.
- Choi Y.H., Kang H.S., Jun I., Keum D.K., Lee H., Kim S.B. et al. Fate of HTO following its acute soil deposition at different growth stages of Chinese cabbage. *J Environ Radioactiv*. 2007; 97: 20–9.

7. Wierczinski B., Müllen G., Türlér A. Tritium enrichment in the hydration sphere of humic substances. *Fusion Sci Technol.* 2005; 48: 783–786.
8. Melintescu A., Galeriu D. A versatile model for tritium transfer from atmosphere to plant and soil. *Radioprotection.* 2005; 40: 437–442.
9. Choi Y.H., Lim K.M., Lee W.Y., Diabate S., Strack S. Tissue free water tritium and organically bound tritium in the rice plant acutely exposed to atmospheric HTO vapor under semi-outdoor conditions. *J Environ Radioactiv.* 2002; 58: 67–85.
10. Keum D., Lee H., Kang H., Jun I., Choi Y., Lee C. Prediction of tritium level in agricultural plants after short term exposure to HTO vapor and its comparison with experimental results. *Health Phys.* 2006; 90: 42–55.
11. *Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments. Technical Reports. Series No. 472.* Vienna: IAEA; 2010.
12. Методика определения концентрации органических и неорганических соединений трития в воздухе окружающей среды и производственных помещений. МУК 4.3.047 — 2017. Аттестована ФГУП ВНИИФТРИ. Свидетельство: № 45063.16326/RA.RU.311243-2015 от 05.05.2016 г.
13. Методические указания по методам контроля. МУК 4.3.044-2012. «Методика определения объемной активности органических и неорганических соединений трития в водных объектах методом жидкосцинтилляционной спектроскопии». Аттестована ФГУП «ВНИИФТРИ». Свидетельство об аттестации методики радиационного контроля № 40090.2B370 от 20 марта 2012 года.
14. Методика определения органических и неорганических соединений трития в пробах почвы и растительности. Свидетельство об аттестации № 5-4/22.01.00087-2012.
15. Руководство пользования прибором Pyrolyser-6 Trio.
16. Руководство пользования прибором Tri-Carb 3180 TR/SL.
17. Методика определения удельной активности соединений трития в грунте и растительности. Свидетельство об аттестации за № 02-22/4.RA.RU.311295-2019.
18. Belot Y., Roy M., Metivier H. *Le tritium de l'environnement à l'homme.* Paris: Éditions de Physique; 1996.
19. ГОСТ 17.4.3.01-83 «Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб».
20. Методика МТ 1.2.1.15.002.0238-2014 «Выполнение измерений при радиационном контроле трития и углерода-14 в помещениях АЭС с применением расходомера-пробоотборника TASC-HT-HTO-C14 (МВК)». Аттестована ФГУП «ВНИИФТРИ». Свидетельство об аттестации № 40063.4Д199/01.00294-2010 от 14 мая 2014 года. Зарегистрирована в Федеральном информационном фонде по ОЕИ № Ф.1.40.2014.18213.
21. Барчуков В.Г., Кочетков О.А., Фомин Г.В., Кабанов Д.И., Иванов Е.А. Распространение трития и его соединений воздушным путем при нормальных условиях эксплуатации Балаковской АЭС. *АНРИ.* 2016; 1: 49–54.

References

1. Jacobs D.G. *Sources of tritium and its behavior upon release to the environment.* United States: AEC Critical Review Series; 1968.
2. Simek D., Dubsek F. Tritium in liquid releases of nuclear power plants with VVER and PWR reactors and some ways to solutions of its reduction. In: *International symposium on safety and reliability systems of PWRs and VVERs, Brno, May 26–30, 1997.* Brno; 1997.
3. Simionov V., Chitu C. Internal Exposure at Cernavoda NPP. In: *2008 ISOE International symposium, Tsuruga, November 13–14, 2008.* Tsuruga; 2008.
4. *Management of Waste Containing Tritium and Carbon-14, Technical Reports Series No. 421.* Vienna: IAEA; 2004.
5. Choi Y.H., Kim S.B., Lim K.M., Park H.K., Lee W.Y. Incorporation into organically bound tritium and the underground distribution of HTO applied to a simulated rice field. *J Environ Radioactiv.* 2000; 47: 279–90.
6. Choi Y.H., Kang H.S., Jun I., Keum D.K., Lee H., Kim S.B. et al. Fate of HTO following its acute soil deposition at different growth stages of Chinese cabbage. *J Environ Radioactiv.* 2007; 97: 20–9.
7. Wierczinski B., Müllen G., Türlér A. Tritium enrichment in the hydration sphere of humic substances. *Fusion Sci Technol.* 2005; 48: 783–786.
8. Melintescu A., Galeriu D. A versatile model for tritium transfer from atmosphere to plant and soil. *Radioprotection.* 2005; 40: 437–442.
9. Choi Y.H., Lim K.M., Lee W.Y., Diabate S., Strack S. Tissue free water tritium and organically bound tritium in the rice plant acutely exposed to atmospheric HTO vapor under semi-outdoor conditions. *J Environ Radioactiv.* 2002; 58: 67–85.
10. Keum D., Lee H., Kang H., Jun I., Choi Y., Lee C. Prediction of tritium level in agricultural plants after short term exposure to HTO vapor and its comparison with experimental results. *Health Phys.* 2006; 90: 42–55.
11. *Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments. Technical Reports. Series No. 472.* Vienna: IAEA; 2010.
12. *Guidelines for control methods.* МУК 4.3.047 — 2017. "Method for determining the concentration of organic and inorganic tritium compounds in the air of the environment and industrial premises", 2017. FGUP VNIIFTRI certified. Certificate: No. 45063.16326/RA.RU.311243-2015 dated 05.05.2016.
13. *Guidelines for control methods.* МУК 4.3.044-2012. "Method for determining the volumetric activity of organic and inorganic tritium compounds in water bodies by liquid scintillation spectrometry", 2012. Certified by FGUP VNIIFTRI. Radiation monitoring method attestation certificate No. 40090.2B370 dated March 20, 2012.
14. Method for determination of organic and inorganic tritium compounds in soil and vegetation samples. Attestation certificate No. 5-4 / 22.01.00087-2012.
15. Manual Pyrolyser-6 Trio.
16. Manual Tri-Carb 3180 TR/SL.
17. Method for determining the specific activity of tritium compounds in soil and vegetation. Certificate of Attestation No. 02-22 / 4.RA.RU.311295-2019.
18. Belot Y., Roy M., Metivier H. *Le tritium de l'environnement à l'homme.* Paris: Éditions de Physique; 1996.
19. GOST 17.4.3.01-83. "Nature protection. Soils. General requirements for sampling".
20. *Technique MT 1.2.1.15.002. 0238-2014 "Carrying out measurements during radiation monitoring of tritium and carbon-14 in NPP premises using a TASC-HT-HTO-C14 (MVK) flow meter-sampler".* Certified by FGUP VNIIFTRI. Attestation certificate No. 40063.4Д199 / 01.00294-2010 dated May 14, 2014. Registered in the Federal Information Fund for OEI No. F.1.40.2014.18213.
21. Barchukov V.G., Kochetkov O.A., Fomin G.V., Kabanov D.I., Ivanov E.A. Air distribution of tritium and its compounds under normal operating conditions of the Balakovo NPP. *ANRI.* 2016; 1: 49–54.