

В.Г. Барчуков

## ОРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ ТРИТИЯ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ И ОРГАНИЗМЕ ЧЕЛОВЕКА

Федеральный медицинско-биофизический центр им. А.И. Бурназяна» ФМБА России, Москва

Контактное лицо: Барчуков Валерий Гаврилович: e-mail: barchval@yandex.ru

### РЕФЕРАТ

**Цель:** Оценка соотношения оксида трития (НТО) и его органических соединений (ОСТ) в окружающей среде и в организме для обоснования дифференцированного подхода при расчете дозы внутреннего облучения у персонала, работающего в условиях наличия трития и его соединений в воздухе рабочей зоны.

**Материал и методы:** Объектом исследования были формы трития НТО и ОСТ, присутствующие в воде, воздухе и организме персонала, работающего в условиях наличия трития и его соединений в воздухе рабочей зоны. Материалом исследований были отобранные образцы воды, воздуха и биологические пробы (моча) персонала. Пробоподготовку отобранного материала проводили по утвержденным методикам, аттестованным в ФГУП «ВНИИФТРИ». Оценку содержания трития в подготовленных образцах осуществляли на жидкостном сцинтилляционном альфа-бета-спектрометре Tri-Carb 3180TR/SL.

**Результаты:** Установлено, что в окружающей среде (вода и воздух) и в условиях производства (воздух рабочей зоны) тритий в большей степени находится в форме ОСТ, что обуславливает преимущественное его поступление в организм персонала в форме ОСТ. Тремя методами было оценено соотношение форм трития в биологических жидкостях (моча) персонала. Показано, что на ОСТ в организме персонала приходится от 70 % до 90 %. Эти данные свидетельствуют о том, что на ОСТ в организме персонала приходится большая доля, нежели НТО, что определяет необходимость пересмотра оценки дозовых нагрузок на персонал при работе с тритием и его соединениями.

**Заключение:** С учетом разработанных методов разделения оксида трития и его органических форм к оценке дозы формируемой тритием, следует подходить дифференцированно, учитывая соотношение этих форм в организме конкретного специалиста.

Ключевые слова: *радиационная безопасность, тритий, оксид трития, органические соединения трития, соотношения концентраций, вода, воздух, персонал*

**Для цитирования:** Барчуков В.Г. Органические соединения трития в окружающей среде и организме человека. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021;66(1):13-19.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-1-13-19

### Введение

Развитие атомной энергетики тесно связано с успешным решением ряда важных проблем по обеспечению радиационной безопасности как персонала, так и населения, проживающего в зоне воздействия радиационно-опасных объектов (далее – РОО) [1]. При этом для окружающей среды вообще, и человека в частности, воздействие РОО в повседневной деятельности определяется количественным и качественным составом сбросов и выбросов с этого объекта. Следует отметить, что современные технологии позволяют максимально уловить из выбросов и сбросов радионуклиды, образующиеся в процессе работы РОО. Однако имеющиеся в настоящее время технологии по улавливанию трития являются затратными и по экономическим причинам их применение ограничено.

Увеличение числа АЭС, планируемое развитие термоядерной энергетики и активное использование тритий-содержащих материалов в промышленности обуславливает увеличение числа лиц, которые в силу своих функциональных обязанностей вынуждены работать в производственных условиях, где тритий и его соединения являются одним из вредных производственных факторов. Это в свою очередь определяет необходимость оценки его содержания в производственной среде и поступления в организм человека.

Рассматривая радиотоксичность трития, следует отметить, что он представляет собой радиоактивный изотоп водорода (период полураспада 12,32 лет), и поэтому химически он ведет себя подобно водороду. Другими словами, вступает в те же химические реакции, что и водород, т.е. образует оксиды, органические соединения и т.д., которые вступают в химические и биохимические реакции, в том числе и в организме человека. Будучи излучателем низкоэнергетических электронов (в среднем

5,7 кэВ при максимуме 18,6 кэВ), его внешнее воздействие не является актуальным, и основная доза формируется при попадании внутрь организма с водой, пищей и при вдыхании воздуха [2]. В отличие от внешнего проникающего излучения, такого как рентгеновское и гамма-излучение, внутреннее облучение обусловленное тритием, в зависимости от химических и биохимических структур, в которые он включен, а также от того в каких формах он находится – оксид трития (далее – НТО) и органических соединений трития (далее ОСТ)) в клетке, может привести к неоднородному (гетерогенному) распределению дозы. Это существенно повышает его радиационную опасность.

При рассмотрении биологических и медицинских последствий внутреннего воздействия трития интерес представляют пять его основных химических форм [2]:

1. Оксид трития (далее НТО).
2. Органические соединения трития (ОСТ), включая насыщенные тритием биохимические субстраты (в частности, дезоксирибонуклеиновые кислоты, белки и т.д.) (соединения, где тритий ковалентно соединен с углеродом).
3. Заменяемые (или нестабильные) ОСТ (ОСТ, где тритий с углеродом соединен через кислород, азот, серу и т.д.).
4. Нерастворимые соединения ОСТ.
5. Газообразные соединения ОСТ.

ОСТ является общим понятием, включающим соединения трития, где он имеет прямую ковалентную связь с углеродом и связь с углеродом через кислород, серу, азот и т.д. Особенностью этих связей в первом случае является то, что пока сама биомолекула не трансформируется или не разрушится в результате ферментативной реакции, тритий остается инкорпорированным. Время нахождения этого соединения в клетке зависит от обо-

рота биомолекул: быстрого для молекул, участвующих в энергетическом цикле, и более медленного в случае структурированных молекул или макромолекул, типа молекул ДНК или молекул энергетических ресурсов. Такой тритий в ОСТ получил название незаменимого или стабильного. Во втором случае тритий имеет такую же силу связи с молекулой углерода, как и в молекуле воды, поэтому легко заменяет протий из молекулы воды, образуя НТО. Тритий, присоединенный к атому кислорода, серы, азота или фосфора легко заменяется водородом в воде. Рядом авторов [3–5] такой тритий не рассматривается в качестве ОСТ или специально квалифицируется как заменяемый ОСТ [6], а в растворах он находится в равновесном состоянии с НТО и обладает его свойствами выведения. Однако так как он включен в органические молекулы, то при распаде приносит больше разрушений, нежели НТО, который в клетке, как отмечено, распределяется равномерно.

В настоящее время пока нет устоявшегося мнения о том, в каких формах тритий находится в организме человека. Наиболее часто встречаются публикации о том, что тритий в организме находится в виде НТО и только 3 % поступившего в организм трития в форме НТО трансформируется в стабильный ОСТ. Этой точки зрения придерживается и МКРЗ [2]. Однако в ряде публикаций [7, 8] отмечается, что если тритий поступает в организм в виде ОСТ, то доза может формироваться до 90 % за счет ОСТ. МКРЗ, обобщая эти данные, придерживается мнения, что только 50 % этих соединений трансформируются в тканях, а 50 % выводятся в виде НТО [9, 10].

Таким образом, в настоящее время еще недостаточно изучена роль ОСТ в формировании дозы облучения человека. Имеющиеся литературные данные обуславливают необходимость оценки соотношения НТО и ОСТ как в окружающей среде, включая и производство, так и в организме персонала. Это в свою очередь определило необходимость разработки методического подхода, позволяющего определить соотношение НТО и ОСТ в пробах [11, 12].

Целью настоящих исследований стала оценка соотношения соединений трития, находящихся в окружающей среде, включая производственную площадку РОО и в организме работающего в этой среде персонала, что позволяет по новому подойти к пониманию формирования дозовой нагрузки от трития.

### Материалы и методы исследования

Важным элементом успешного достижения поставленной цели является разработка адекватного методического аппарата, где основное внимание должно быть уделено разделению НТО и ОСТ. До настоящего времени все дозиметрические исследования проводятся из расчета, что тритий присутствует в организме только в виде НТО, эффективный период полувыведения которого принят равным 10 сут (для взрослого) [13]. Позднее в литературе были опубликованы данные о том, что пренебрежение ОСТ при дозиметрических расчетах, т. е. проведение расчетов по моделям, основанным только на характеристиках обменного трития, может приводить к недооценке дозы [14]. Это в первую очередь связано с тем, что стабильный ОСТ дольше удерживается в организме (у взрослых эффективный период полувыведения составляет 40 сут), а во-вторых его относительная биологическая эффективность (далее – ОБЭ) существенно выше, чем у НТО [15].

В настоящее время очень немногие страны, в частности Франция, осуществляют измерение ОСТ [16]. Получаемые научные данные свидетельствуют о том, что его

анализ должен стать частью регулярного мониторинга в ближайшие несколько лет [17]. Так, материалы Института ядерной и радиационной безопасности Франции (IRSN) убедительно показывают, что мониторинг трития в окружающей среде и на протяжении всей пищевой корзины с использованием признанных научным сообществом методов контроля, должен быть увеличен [17].

Исходя из изложенного выше очевидно, что необходимо концептуально изменить подход по оценке дозы от трития и его соединений, взяв за основу оценку эффективной дозы в зависимости от форм трития, поступающих и содержащихся в организме. Причем наиболее актуальна проблема на производствах, где персонал в силу технологических особенностей вынужден работать с тритием и его соединениями. В связи с этим в настоящее время задачей номер один является разработка подходов по определению форм трития, поступающих в организм персонала из воздуха рабочей зоны и с водой, как основными источниками поступления трития и его соединений в производственных условиях.

Имеющиеся литературные данные свидетельствуют о том, что в воде тритий может быть представлен как в виде оксида НТО, так и в виде различных соединений (в гумусе, бактериях, в аэрозолях, карбонатах и различных органических молекулах). В воздухе тритий может быть представлен в газообразном виде простых соединений ( $T_2$ , НТ), в виде органических соединений (метан и т. д.), а во влаге воздуха – в виде оксида или в связанном виде на аэрозолях, бактериях, карбонатах, органических молекулах.

Как отмечено выше, для оценки вклада соединений трития в суммарную активность трития в исследуемом объекте необходимо разделить ОСТ и НТО. Для определения ОСТ широкое распространение получила хромато-масс-спектрометрия, сочетающая такой способ разделения смесей, как хроматография в сочетании с одним из наиболее информативных методов определения структуры органических соединений – масс-спектрометрией. Однако основным его недостатком является трудоемкость и невозможность выделить НТО из анализируемого образца. Современные мембранные технологии позволили совершенствовать методологию разделения НТО от других соединений трития, содержащихся в воде.

Нами для разделения ОСТ и НТО использована последовательная двухкаскадная фильтрация проб при использовании угольного фильтра типа «Барьер», задерживающего частицы размером более 1 мкм, и мембранного, обратноточного фильтра TiM 1.00С, задерживающего наночастицы размером более 0,1 нм. При этом следует отметить, что из соединений трития в жидком состоянии размер менее 0,1 нм имеет только молекула НТО. Молекулы ОСТ имеют размеры более 0,1 нм [18]. Последовательная каскадная фильтрация для выделения ОСТ была использована впервые, хотя сам принцип применяется в медицине (разделение крови) и гидрогеологии (разделение органических веществ — метод Б. Дюпре), то есть известен достаточно давно. На основе этого принципа разделения была разработана и аттестована методика определения объемной активности органических и неорганических соединений трития в водных объектах методом жидкосцинтилляционной спектрометрии [11].

Как отмечено выше, ведущим фактором в формировании дозы от трития и его соединений у персонала является их содержание в воздухе, где в отличие от воды тритий может присутствовать в газообразной форме в виде НТО и ОСТ. Для дифференцированной оценки содержания трития (в газообразной форме, НТО и ОСТ) в

воздухе был применен двухэтапный подход. На первом этапе разделили газообразный тритий от НТО и ОСТ. С этой целью для отбора проб воздуха в настоящее время широкое распространение получил метод барботирования, реализованный в расходомере-пробоотборнике трития и углерода-14 TASC-НТ-НТО-С14 [19], позволяющий выделить тритий, находящийся в газообразном соединении (НТ, Т<sub>2</sub>, СН<sub>2</sub>Т, и т.д.), от трития, находящегося в соединениях НТО и ОСТ. На втором этапе для разделения НТО и ОСТ был использован описанной выше принцип двухкаскадной фильтрации проб. На основе этих подходов была разработана и аттестована методика определения объемной активности трития и его соединений в воздухе [12].

Чтобы оценить содержание трития в организме человека, в настоящее время принято исследовать биологические жидкости. Наиболее удобно с этой целью использовать мочу персонала [20]. Для определения соотношения форм трития, присутствующих в организме персонала было использовано три подхода, методически отличающихся друг от друга, но направленных на исследования соотношения форм трития (НТО и ОСТ) в организме.

Для разделения присутствующих в организме форм трития был использован принцип разделения компонентов мочи с использованием мембранного, обратноосмотического фильтра ГиМ 1.00С, задерживающего наночастицы размером более 0,1 нм. Чтобы фильтр не забивался, мочу предварительно разбавляли в 5 раз дистиллированной водой с содержанием трития не более 2 – 5 Бк/кг. Перед фильтрацией и после фильтрации (фильтрат) объемную активность трития во всех пробах определяли методом жидкосцинтилляционной спектрометрии с помощью жидкостного сцинтилляционного альфа-бета спектрометра Tri-Carb 3180TR/SL [21].

Так как разбавление образцов мочи может внести определенную погрешность в соотношение форм трития, процедура разбавления была заменена разделением крупных частиц (лейкоциты, эритроциты, соли, крупные белки и т.д.) и молекулярных форм ОСТ на роторном испарителе Heidolph Nei VAP Precision ML/G3B. Достоинством данного испарителя являются специальные программы дистилляции, которые позволяют проводить автоматический поиск нескольких точек кипения для многокомпонентных систем. Обновленный вакуумный контроллер с внешним вакуумным сенсором обеспечивает высокий уровень точности. Полученный таким образом кубовый осадок содержит в основном тритий, находящийся в крупных органических соединениях или в клетках, а дистиллят содержит оксид трития, а также стабильные и нестабильные органические соединения трития, имеющие размеры молекул, позволяющие им перескочить в дистиллят.

Извлечения трития из кубового осадка осуществлялось на приборе Pyrolyser-6 Tg10 в соответствии с руководством пользователя [22]. Разделение НТО и ОСТ в дистилляте осуществляли по методике [11]. Объемную активность трития во всех пробах определяли методом жидкосцинтилляционной спектрометрии с помощью жидкостного сцинтилляционного альфа-бета спектрометра Tri-Carb 3180TR/SL.

Третьим подходом в оценке соотношения форм трития, содержащегося в моче персонала, стал анализ выведения соединений трития из организма за время отпуска, т.е. за тот временной промежуток, когда специалист не сталкивался с факторами производственной среды. С этой целью перед уходом в отпуск и в первого дня до начала работы после отпуска измеряли объемную актив-

ность трития в моче. Зная время отпуска, уровень трития в моче до и после отпуска с учетом принятой МКРЗ моделью кинетики соединений трития можно рассчитать соотношение НТО и ОСТ в организме работника. В настоящем исследовании расчет проведен в предположении, что в организме работника тритий находится в форме НТО и ОСТ. Значения удельной активности трития в моче работника перед уходом и по возвращении из отпуска (А<sub>1</sub> и А<sub>2</sub> соответственно) ее можно представить в виде:

$$A_1 = A_1^{НТО} + A_1^{ОСТ}, \quad (1)$$

$$A_2 = A_2^{НТО} + A_2^{ОСТ}, \quad (2)$$

где А<sub>1</sub><sup>НТО</sup>, А<sub>1</sub><sup>ОСТ</sup>, А<sub>2</sub><sup>НТО</sup> и А<sub>2</sub><sup>ОСТ</sup> – удельные активности НТО и ОСТ в моче работника перед уходом в отпуск и по возвращении из отпуска, соответственно.

Изменение удельной активности соединения трития в моче за период t (сут) нахождения работника в отпуске описывается уравнением:

$$A_2 = A_1 \cdot 2^{-\frac{t}{t_{1/2}}}, \quad (3)$$

где t<sub>1/2</sub>– период полувыведения данного соединения, сут.

Согласно модели МКРЗ период полувыведения (t<sub>1/2</sub>) для НТО равен 10 сут, а для ОСТ – 40 сут. Следует отметить, что к ОСТ, выводимым с периодом полувыведения 40 сут, отнесены стабильные формы ОСТ.

С учетом (3) преобразуем (2) в виде:

$$A_2 = A_1^{НТО} \cdot 2^{-\frac{t}{10}} + A_1^{ОСТ} \cdot 2^{-\frac{t}{40}}, \quad (4)$$

Из уравнений (1) и (4) получим систему уравнений:

$$\begin{cases} A_1 = A_1^{НТО} + A_1^{ОСТ} \\ A_2 = A_1^{НТО} \cdot 2^{-\frac{t}{10}} + A_1^{ОСТ} \cdot 2^{-\frac{t}{40}} \end{cases}, \quad (5)$$

Решение этой системы уравнений для каждого работника позволяет рассчитать содержание трития в форме НТО и ОСТ в его организме перед уходом в отпуск и, следовательно, оценить соотношение НТО, включая и нестабильные формы ОСТ (третий с углеродом соединен через кислород, азот, серу и т.д.), и стабильных форм ОСТ (третий ковалентно соединен с углеродом):

$$A_1^{ОСТ} = \frac{A_2 - A_1 \cdot 2^{-\frac{t}{10}}}{2^{-\frac{t}{40}} - 2^{-\frac{t}{10}}}, \quad (6)$$

$$A_1^{НТО} = A_1 - A_1^{ОСТ}, \quad (7)$$

Расчет средней по выборке и средней квадратичной рассчитывали методом одномерной вариационной статистики в программе Microsoft Office Excel 2007.

### Результаты и обсуждение

Проведен ряд исследований по оценке соотношения соединений трития в объектах окружающей среды (вода и воздух, включая воздух рабочей зоны нескольких производств, где вследствие технологических особенностей возможно присутствие трития и его соединений), а также соотношение НТО и ОСТ в организме персонала этих производств.

Отбор проб воды осуществлялся в соответствии с ГОСТ 31861-2012 [23]. Образцы воды отбирали из скважин и водоемов, расположенных на территории РОО

Таблица 1

Соотношение соединений трития в пробах воды, взятых в районе расположения предприятий ГК Росатом

The ratio of tritium compounds in water probes taken in the area of the enterprises of the Rosatom State Corporation enterprise

№ п/п	Место отбора пробы	Содержание НТО в пробе, %	Содержание ОСТ в пробе, %
1	Скважина 005 (под хранилищем РАО (ФЭИ))	2	98
2	Скважина 144 (в 100 м от хранилища РАО (ФЭИ))	36	64
3	Поверхностная вода из р.Саровка	27	73
4	Оз. Удомля, д. Ряд (КалнАЭС)	6	94
5	Скважина 21 (КалнАЭС)	9	91
6	Шламоотвал (БалАЭС)	13	87
7	Пруд-охладитель (БалАЭС)	12	88

и в зоне их наблюдения. Пробоподготовку и анализ счетных образцов осуществляли по методике [11]. В результате проведенных исследований были получены соотношения НТО и ОСТ, представленные в табл. 1.

Полученные данные свидетельствуют о том, что в исследованных пробах воды преобладает ОСТ (от 64 % до 98 %).

Как отмечено выше, ведущим фактором в формировании дозы от трития и его соединений у персонала является их содержание в воздухе рабочей зоны, где в отличие от воды тритий в организм может поступать в газообразной форме, а также с влагой воздуха в виде НТО и ОСТ. Для того чтобы понять в каких формах тритий поступает в организм персонала, необходимо было оценить соотношение этих трех форм в воздухе рабочей зоны. Используя методику [12], нами были проведены исследования соотношения НТО и ОСТ в воздухе населенных пунктах, расположенных в зоне наблюдения (далее ЗН) РОО и на промплощадке этого предприятия. В результате проведенных исследований

были получены данные о соотношениях соединений трития, представленные в табл. 2

Анализ соотношения форм трития на промплощадке и в ЗН свидетельствует о том, что в ЗН трития в газообразной форме в долевого соотношении больше, чем на промплощадке. Это связано с тем, что тритий, образующийся в первом контуре на АЭС с реактором ВВЭР-1000, вследствие ядерной реакции и борного регулирования поступает в воздух гермооболочки реакторного зала и через вентиляционные системы выбрасывается в атмосферу. Населенные пункты п. Натальино и с. Матвеевка находятся на расстоянии оседания факела из вентиляционной трубы. Поселок Широкий Буерак находится на расстоянии в 2 раза дальше, чем два первых населенных пункта. В этом причина меньшего содержания трития в газообразной форме и больше в НТО и ОСТ. Как видно из табл. 2 также особенностью соотношений форм трития в ЗН является то, что доли НТО и ОСТ равны. Это говорит о том, что проходит столько времени, которого

Таблица 2

Соотношение трития и его соединений в воздухе рабочей зоны на предприятии ГК Росатом и в воздухе рядом расположенных населенных пунктов

The ratio of tritium and its compounds in the air of the working area at the enterprise of State Corporation Rosatom and in the air of nearby settlements

№ п/п	Место отбора пробы	Соотношения трития и его соединений в пробе, %			
		Тритий (газ)	НТО	ОСТ	
1	АЭС с реактором ВВЭР-1000	Машинный зал	8	18	74
2		Реакторный зал	21	32	47
3		Помещения спецкорпуса (прачечная)	6	63	31
4		Брызгальный бассейн	0	50	50
5	Населенный пункт в ЗН АЭС с реактором ВВЭР-1000	п. Натальино	40	30	30
6		с. Матвеевка	44	28	28
7		п. Широкий Буерак	34	33	33

Таблица 3

**Соотношение форм трития в биологической жидкости (моча) персонала, работающего в условиях присутствия в воздухе рабочей зоны трития и его соединений**

**The ratio of forms of tritium in biological fluid (urine) personnel, working in the conditions of presence in the air of the working area of tritium and its compounds**

№ п/п	Разделение соединений трития методом фильтрации		Разделение соединений трития методом испарения		
	НТО	ОСТ	НТО	ОСТ <sub>куб</sub>	ОСТ <sub>фильтрат</sub>
1	1	99	1	39	60
2	1	99	1	16	83
3	11	89	9	8	83
4	1	99	1	14	85
5	6	94	5	9	86
6	15	85	10	3	87
7	12	88	8	7	85
8	4	96	3	9	88
9	1	99	4	8	88
10	4	96	5	10	85
M±σ	5,6 ± 5,3	94,4 ± 5,3	4,7 ± 3,4	12,3 ± 10,1	83,0 ± 25,3

хватает только на то, чтобы произошел изотопный обмен между тритием в газообразном состоянии и протием воды, а также протием в соединениях с молекулами азота, кислорода, серы и т.д., содержащихся в органических соединениях влаги воздуха.

На промплощадке картина соотношения НТО и ОСТ другая. Наибольшее содержание газообразного трития содержится в воздухе реакторного зала, что понятно, так как его источником является реактор. Однако его объемная активность в два раза меньше, чем в населенных пунктах. Это связано, скорее всего, с тем, что забор воздуха в реакторном зале осуществляли при остановленном реакторе во время его перезагрузки, когда образование трития минимально и в реакторный зал можно войти только тогда, когда реактор остановлен. В остальных помещениях АЭС содержание газообразного трития минимально, что связано с эффективной работой вентиляционных систем, которые позволяют минимизировать поступление трития в рабочие помещения АЭС. Если рассматривать соотношения НТО и ОСТ на промплощадке, то видно, что соотношение ОСТ колеблется от 31 % до 74 %.

На основе данных о соотношениях форм трития в воде и воздухе рабочей зоны (основные пути поступления трития в организм персонала) показано, что значимый вклад поступления трития в организм вносит ОСТ. В связи с этим, следовало понять, в каких формах тритий находится в организме персонала, который на протяжении своей профессиональной деятельности работает в условиях наличия трития в воздухе рабочей зоны. С этой целью нами был осуществлен отбор проб мочи у персонала, работающего в условиях присутствия в воздухе рабочей зоны трития и его соединений.

Анализ соотношений НТО и ОСТ осуществляли как описано в разделе «материал и методы» исследования. По 100 мл отобранной мочи брали на пробоподготовку методом фильтрации, а пробоподготовку оставшегося объема осуществляли на роторном испарителе. Полученные результаты представлены в табл. 3.

Данные полученные методом фильтрации, свидетельствуют о том, что около 5 % трития в организме содержится в форме НТО. Примерно такое же соотношение было получено и при пробоподготовке методом испарения. Расхождение в этом показателе было не более 1 %.

Для исследования соотношения форм трития в организме персонала, как описано выше, также был использован метод расчета выведения трития из организма персонала за время его отпуска, т.е. за время, когда специалист не сталкивался с вредными профессиональными факторами (тритием). С целью получения необходимых данных для расчета у персонала перед убытием в отпуск и в первый день после отпуска исследовали содержание трития в моче [20]. Зная эти показатели и продолжительность в отпуска, осуществляли расчет соотношения форм трития (НТО и ОСТ), которое было у специалиста перед убытием в отпуск. В исследование было взято 20 работников, которые в соответствии с должностными обязанностями периодически посещали помещения, где в воздухе рабочей зоны присутствовал тритий и его соединения. Также была оценено выведение трития за время отпуска у 21 работника, которые все рабочее время в соответствии со своими функциональными обязанностями находились на рабочих местах, где в воздухе рабочей зоны присутствовал тритий и его соединения. В результате расчета оказалось, что у работников первой группы выведение соединений трития соответствовало принятой в настоящее время модели, т.е. в форме стабильного ОСТ у них было не более 6 %. У специалистов второй группы выведение соединений трития не соответствовало этой модели. У этих работников по расчетным данным перед убытием в отпуск трития в форме стабильного ОСТ было в организме от 10 до 97 %. Полученные данные о соотношении форм трития в организме персонала в группе, не соответствующей принятой модели представлены в табл. 4

Полученные результаты этого эксперимента свидетельствуют о том, что у работников, длительно работающих в условиях поступления трития и его соединений в организм, 39 % трития находится в форме стабильного ОСТ.

Таблица 4

**Соотношение форм трития в организме работников, у которых имело место его несоответствие принятой модели**  
**The ratio of forms of tritium in the body of workers, who had a discrepancy with adopted model**

№ п/п	НТО, %	ОСТ, %
1	85	15
2	70	30
3	58	42
4	90	10
5	78	22
6	76	24
7	85	15
8	3	97
9	14	86
10	29	71
11	81	19
12	69	31
13	65	35
14	37	63
15	59	41
16	74	25
17	77	23
18	56	44
19	70	30
20	41	59
21	70	30
M±σ	61,3 ± 23,7	38,7 ± 23,8

### Заключение

Обобщая полученные данные следует заключить, что в окружающей среде и в условиях производства тритий в большей степени находится в форме ОСТ. Необходимо отметить, что каждая среда присутствия трития имеет особенности в соотношениях НТО и ОСТ. В воде отмечается закономерность роста ОСТ со снижением скорости обмена воды, что обусловлено достаточным временем для изотопного обмена и включения трития в органические соединения (гумус, карбонаты, бактерии и т.д.). В воздухе рабочей зоны также отмечается преобладание ОСТ. Таким образом, видно, что в организм персонала тритий поступает преобладающе в форме ОСТ. Исходя из этого, по-прежнему актуальным является вопрос – если в организм тритий поступает преимущественно в форме ОСТ, то в каких формах тритий находится в организме персонала?

Проведенные исследования показали, что в организме персонала также преобладает ОСТ. Анализируя данные по соотношению НТО и ОСТ в организме, полученные методами фильтрации и перегонки биосубстрата (моча), можно видеть, что на долю ОСТ (сумма стабильного и нестабильного) приходится более 90 %. Расчетный метод, основанный на оценке выведения трития, показал, что в организме персонала, постоянно работающего в условиях

присутствия в воздухе рабочей зоны трития и его соединений, вклад стабильного ОСТ составляет около 39 %.

Сравнивая эти результаты с таковыми, полученными методами фильтрации и выпаривания, следует отметить, что 39 % – это только доля стабильных форм ОСТ, т.е. те формы, которые имеют период полувыведения 40 сут. По имеющимся литературным данным [2], НТО и нестабильные ОСТ, имеющие период полувыведения 10 сут, находятся в равновесном состоянии. Таким образом, их вклад в баланс трития будет по 30 % от каждой формы. Суммируя 39 % ОСТ стабильного и 30 % ОСТ нестабильного, получается, что в организме персонала, длительно работающего в условиях воздействия трития и его соединений, почти 70% находится в форме ОСТ.

Сравнивая данные, полученные тремя разными методами, видно, что в организме персонала, длительно работающего в условиях присутствия в воздухе рабочей зоны трития и его соединений, на ОСТ приходится большая доля, нежели НТО, что определяет необходимость пересмотра оценки дозовых нагрузок на персонал при работе с тритием и его соединениями. С учетом разработанных методов разделения оксида трития и его органических форм, к оценке формируемой тритием дозы, следует подходить дифференцированно, учитывая соотношение этих форм в организме конкретного работника.

## Tritium Organic Compounds in the Environment and Human Organism

V.G.Barchukov

A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

Contact person: Bashkov Andrey Nikolaevich: abashkov@yandex.ru

### ABSTRACT

**Purpose:** To evaluate the ratio of tritium oxide and tritium organic compounds in the environment and in the body in order to justify the graded approach when calculating the dose for the personnel working in the presence of tritium and its compounds in the air of the working area.

**Material and methods:** The study covered the forms of tritium (HTO and OBT) in water, air and bodies of the personnel working under conditions of the presence of tritium and its compounds in the air of the working area. Samples of water, air and biological assays (urine) of the personnel were collected for the study. Sample preparation of the collected material was carried out according to the approved methods certified by the Federal State Unitary Enterprise “VNIIFTRI”. The liquid scintillation alpha-beta spectrometer Tri-Carb 3180TR/SL was used when estimating tritium concentrations in the preformed samples.

**Results:** It has been established that in the environment (water and air) and under the industrial conditions (air of the working area), tritium is to a greater extent in the form of OBT, which determines its predominant intake into the body of the personnel in the form of OBT. The ratio of tritium forms in biological fluids (urine) of the personnel was estimated using three methods. It was shown that OBT in the body of the personnel accounted for 70 to 90 %. These data indicate that OBT in the body of the personnel accounts for a larger share in comparison with HTO, therefore, the dose assessments of the personnel when working with tritium and its compounds should be revised.

**Conclusion:** Taking into account the developed methods for the separation of tritium oxide and its organic forms, the assessment of the dose induced by tritium exposure should be performed gradually, taking into account the ratio of these forms in the body of the particular worker.

**Keywords:** radiation safety, tritium, tritium oxide, organically bound tritium compounds, HTO/OBT ratio, water, air, personnel

**For citation:** Barchukov V.G. Tritium Organic Compounds in the Environment and Human Organism. Medical Radiology and Radiation Safety 2021;66(1):13-19.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-1-13-19

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Кочетков ОА, Монастырская СГ, Кабанов ДИ Проблемы нормирования техногенного трития (обзор). Саратовский научно-медицинский журнал. 2013; 9(4): 815 – 819 [Kochetkov OA, Monastyrskaya SG, Kabanov DI Problems of anthropogenic tritium limitation (review). Saratov Journal of Medical Scientific Research. 2013; 9(4): 815 – 819 (In Russian)].
2. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2016 Report. Report to the General Assembly. Annex C. Biological effects of selected internal emitters —Tritium. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations, New York, 2016.
3. Diabate S, Strack S. Organically bound tritium. Health Phys, 1993, 65(6): 698-712
4. Rochalska M, Szot Z. The incorporation of organically-bound tritium of food into some organs of the rat. Int J Radiat Biol Relat Stud Phys Chem Med, 1977, 31(4): 391-5
5. Saito M, Ishida MR, Travis CC. Dose-modification factor for accumulated dose to cell nucleus due to protein-bound <sup>3</sup>H. Health Phys 1989, 56(6): 869-74
6. Kim SB, Baglan N, Davis PA. Current understanding of organically bound tritium (OBT) in the environment. J Environ Radioact 2013; 126: 83-91
7. Balonov MI Tritium dosimetry and standardization Energoat-

- omizdat 1983.
8. Balonov MI, Muksinova KN, Mushkacheva GS. Tritium radiobiological effects in mammals: review of experiments of the last decade in Russia. *Health Phys.* 1993; 65(6): 713-26.
  9. ICRP. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 1. ICRP Publication 56. *Annals of the ICRP*, 1990; 20(2).
  10. ICRP. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 2. Ingestion dose coefficients. ICRP Publication 67. *Annals of the ICRP*. 1993; 23(3-4).
  11. Методические указания по методам контроля. МУК 4.3. 044-2012. Методика определения объемной активности органических и неорганических соединений трития в водных объектах методом жидкосцинтилляционной спектрометрии. Аттестована ФГУП «ВНИИФТРИ». Свидетельство об аттестации методики радиационного контроля №40090.2В370 от 20 марта 2012 года. (In Russian).
  12. МУК Методика определения концентрации органических и неорганических соединений трития в воздухе окружающей среды и производственных помещений МУК 4.3.047-2017. Методика аттестована ФГУП «ВНИИФТРИ». Свидетельство об аттестации № 45063.16326/ RA. RU. 311243-2015 от 5 мая 2016 года. (In Russian).
  13. ICRP. Limits for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 30 (Part 3). *Ann ICRP*, 1981; 6 (2-3).
  14. ICRP, 2016. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 2. ICRP Publication 134. *Ann. ICRP*, 2016; 45(3/4), 1-352.
  15. Воробьева НЮ, Кочетков ОА, Пустовалова МВ и др. Сравнительные исследования образования фокусов  $\gamma$ H2AX в мезенхимных стволовых клетках человека при воздействии  $^3\text{H}$ -тимидина, оксида трития и рентгеновского излучения. *Клеточные технологии в биологии и медицине*, 2018;(3):205-8. [Vorobyeva NYu, Kochetkov OA, Pustovalova MV, Grehova AK, Blohina TM, Yashkina EI, et al. Comparative study of  $\gamma$ H2AX foci formation in human mesenchymal stem cells exposed to  $^3\text{H}$ -thymidine, tritium oxide and X-rays. *Cell Technologies in Biology and Medicine*. 2018;3:205-8. (In Russian).]
  16. Pointurier F, Baglan N, Alanic G, Chiappini R. Determination of organically bound tritium background level in biological samples from a wide area in the south-west of France. *J Environ Radioactivity*. 2003; 68:171-189.
  17. Baglan N, Kim SB, Cossonnet C, Croudace IW, Fournier M, Galeriu D. et al. Organically bound tritium (OBT) behaviour and analysis: outcomes of the seminar held in Balaruc-les-Bains in May 2012. *Radioprotection* 2013; 48(1):127-44
  18. Кабанов ДИ, Кочетков ОА, Фомин ГВ, Вайзер ВИ, Веселов ВМ. К обоснованию контроля органически связанного трития в окружающей среде ядерных установок. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез*, 2012; (1):17-22. [Kabanov DI, Kochetkov OA, Fomin GV, Vaizer VI, Veselov VM To justification of organically bound tritium monitoring in nuclear facilities environment. *Problems of atomic science and technology Series thermonuclear fusion*. 2012; (1):17-22. DOI: 10.21517/0202-3822-2012-35-1-17-22 (In Russian). ]
  19. 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-НТ-НТО-С14 (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 (In Russian).
  20. Тритий и его соединения. Контроль величины индивидуальной эффективной дозы внутреннего облучения при поступлении в организм человека. (In Russian).
  21. Руководство пользования прибором Tri-Carb 3180 TR/SL.
  22. Руководство пользования прибором Pyrolyser-6 Trio
  23. Межгосударственный стандарт ГОСТ 31861-2012. «Вода Общие требования к отбору проб». 2014 г.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Участие авторов.** Статья подготовлена с участием одного автора.

**Поступила:** 29.09.2020. Принята к публикации: 23.12.2020.

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

**Financing.** The study had no sponsorship.

**Contribution.** Article was prepared with single author.

**Article received:** 29.09.2020. Accepted for publication: 23.12.2020.