

tom» на Severo-Zapade Rossii (R JaM-10): ruk-vo R 2.6.5–10. M., 2010.

9. Rukovodstvo «Gigienicheskie trebovanija po obrashheniju s promyshlennymi othodami na Federal'nom gosudarstvennom unitarnom predpriyatii «Severnoe federal'noe predpriyatие po obrashheniju s radioaktivnymi othodami»» R ONAO SevRAO-08: Utv. Glavnym gosudarstvennym sanitarnym vrachom po obsluzhivaemym organizacijam i obsluzhivaemym territorijam 24.01.2008 g. R 2.6.5.04–08 R. ONAO SevRAO-08. M., 2008.

10. Mediko-biologicheskie i jekologicheskie posledstvija radioaktivnogo zagraznenija reki Techa / nauch. red. A.V. Akleev, M.F. Kiselev; Ural'skij nauch.-prakt. centr radiacionnoj mediciny. M., 2001. 530 s.

11. Jekologicheskie i medicinskie posledstvija radiacionnoj avarii 1957 goda na PO «Majak» / nauch. red. A.V. Akleev, M.F. Kiselev; Ural'skij nauch.-prakt. centr radiacionnoj mediciny. M., 2001. 294 s.

12. Progress report on the Regulatory Cooperation Program between the Norwegian Radiation Protection Authority and the Federal Medical Biological Agency of Russia: Projects and other activities Completed in 2008–2009 and Plans for 2010–2011 // Statens stralevern Norwegian Radiation Protection Authority: Stralevern Rapport. 2011. № 7. 52 pp.

13. Shandala N.K., Sneve M. K, Smith G. M. et al. // Journal of Radiological Protection. 2008. № 28. P. 453–465.

14. Shandala N.K., Titov A.V., Sneve M.K. [et al.] // Journal of Radiological Protection. 2008. № 28. P. 479–497.

УДК: 614.76

Обзор

ПРОБЛЕМЫ НОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННОГО ТРИТИЯ (ОБЗОР)

О. А. Кочетков — ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации — Федеральный медицинский биофизический центр им. А. И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства», заведующий лабораторией радиационной безопасности персонала, кандидат технических наук; **С. Г. Монастырская** — ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации — Федеральный медицинский биофизический центр им. А. И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства», ведущий научный сотрудник лаборатории радиационной безопасности персонала, кандидат медицинских наук; **Д. И. Кабанов** — ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации — Федеральный медицинский биофизический центр им. А. И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства», инженер лаборатории радиационной безопасности персонала.

PROBLEMS OF ANTROPOGENIC TRITIUM LIMITATION (REVIEW)

O.A. Kochetkov — State Scientific Research Center n.a. A. I. Burnazyan — Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Head of Radiation Safety Laboratory, Candidate of engineering sciences; **S. G. Monastyrskaya** — State Scientific Research Center n.a. A. I. Burnazyan — Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Radiation Safety Laboratory, Senior Research Scientist, Candidate of medical sciences; **D.I. Kabanov** — State Scientific Research Center n.a. A. I. Burnazyan — Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Radiation Safety Laboratory, Engineer.

Дата поступления — 18.11.2013 г.

Дата принятия в печать — 16.12.2013 г.

Кочетков О. А., Монастырская С. Г., Кабанов Д. И. Проблемы нормирования техногенного трития (обзор) // Саратовский научно-медицинский журнал. 2013. Т. 9, № 4. С. 815–818.

Изложено современное представление о содержании техногенного и природного трития в окружающей среде. Приведены и проанализированы отечественные нормативы для оксида трития (НТО), представленные в нормах радиационной безопасности (НРБ), а также нормы для трития в питьевой воде, принятые в других странах. Заострено внимание на основной проблеме трития — нормировании органического соединения трития, что обусловлено особенностью его воздействия на человека.

Ключевые слова: тритий, органическое соединение трития, нормативный документ, человек.

Kochetkov O.A., Monastyrskaya S. G., Kabanov D.I. Problems of anthropogenic tritium limitation (review) // Saratov Journal of Medical Scientific Research. 2013. Vol. 9, № 4. P. 815–818.

This article contains the current situation in respect to the environmental concentrations of anthropogenic and natural tritium. There are presented and analyzed domestic standards for HTO of all Radiation Safety Standards (NRB), as well as the regulations analyzed for tritium in drinking water taken in other countries today. This article deals with the experience of limitation of tritium and focuses on the main problem of rationing of tritium — rationing of organically bound tritium.

Key words: tritium, organically bound tritium, normative document, human.

В последнее время пристальное внимание научной общественности обращено на экологическое состояние среды обитания человека вследствие интенсивного развития промышленных технологий, производящих и использующих техногенный тритий, в том числе и в атомной отрасли. При этом отмечается возможное увеличение вклада техногенного трития в радиационную нагрузку на население.

Тритий является одним из изотопов водорода и относится к категории глобальных нуклидов. В настоящее время природный уровень трития составляет 1,3

ЭБк. По оценкам авторов [1], современный средний уровень содержания трития в воде составляет 2–5 Бк/л, что формирует годовую дозу облучения человека около $3 \cdot 10^{-2}$ мкЗв/год¹.

В ядерных реакторах, работающих на тепловых нейтронах, в результате ядерных превращений образуется тритий, который может попадать в окружающую среду с газообразными или жидкими сбросами и выбросами, как непосредственно с АЭС, так и при дальнейшей переработке облученного ядерного топлива (табл. 1).

Как следует из представленных данных, поступление трития в окружающую среду от предприятий сопоставимо с природным содержанием в биосфере.

Ответственный автор — Кочетков Олег Анатольевич
Адрес: 123182, г. Москва, ул. Живописная, д. 46.
Тел.: +7-499-190-93-40
E-mail: okochetkov@fmbcfmba.ru

Количественная оценка поступления трития в окружающую среду с различных предприятий [2]

Тип предприятия	Годовой объем выделения трития, ПБк/год	
	Выброс	Сброс
Реакторы деления тепловыми нейтронами с легководным теплоносителем под давлением типа ВВЭР (WWER)	0,71	
Реакторы деления тепловыми нейтронами с легководным кипящим теплоносителем типа РБМК (LWGR)	0,016	0,01
Реакторы деления тепловыми нейтронами с легководным теплоносителем под давлением типа PWR	0,76	5,3
Реакторы деления тепловыми нейтронами с легководным кипящим теплоносителем типа BWR	0,14	0,29
Реакторы деления тепловыми нейтронами с тяжеловодным теплоносителем под давлением типа HWR (PHWR)	15,5	3,8
Заводы по переработке отработавшего ядерного топлива реакторов PWR/ BWR	35,8	28,2
Всего	90,5	
Среднегодовое мировое природное образование трития в атмосфере	148	

Попадая в организм человека, тритий существует в виде двух отдельных соединений: оксида трития (НТО) и органических соединений трития (ОСТ). Кинетика обмена радионуклида в тканях характеризуется биологическим периодом полувыведения ($T_{1/2\beta}$) — временем, в течение которого выделяется половина поступившего в организм радиоактивного вещества. Период полувыведения трития из организма человека в виде НТО составляет около 10 дней, а для ОСТ $T_{1/2\beta}$ более года и зависит от вида ОСТ [3–6].

Распространяясь во всех структурах организма, органические соединения трития представляет собой более серьезный фактор риска для человека, чем оксид трития (при одинаковом содержании трития), поскольку значительно выше вероятность проникновения органического соединения трития в состав ДНК или другие биомолекулы. Например, органически связанный тритий, попадающий в организм с пищей, более вероятно войдет в состав биомолекул, чем тритий, который проникает в организм с питьевой водой. У трития средний пробег β -частиц в ткани 1 мкм, как чистого низкоэнергетического β -излучателя, со средней энергией бета-излучения 5,8 кэВ и максимальной энергией излучения 18,5 кэВ. Вследствие этого разница в повреждениях, нанесенных тритием, который сконцентрирован в ядре клетки (где находится ДНК), и тем, который находится в цитоплазме, будет велика.

Нормативы, ограничивающие техногенное воздействие факторов окружающей среды, устанавливаются специально уполномоченными государственными органами в области санитарно-эпидемиологического нормирования и совершенствуются по мере развития науки и техники с учетом международных рекомендаций.

За полувековой период санитарно-гигиенического нормирования в России допустимые нормы по тритию менялись как в сторону ужесточения, так и ослабления, что свидетельствует не только о развитии научных знаний о биологическом действии и поведении трития и его соединений, но и о неустойчивости этих знаний (табл. 2).

Как видно из данных табл. 2, отношение к воздействию трития на протяжении 50 лет изменялось неоднократно, от НРБ-333–60 до НРБ-99/2009 допустимые концентрации трития в воздухе рабочей зоны увеличились на 3 порядка, при значительном коле-

бании стандартов предела годового поступления для персонала. Аналогичная тенденция отмечается и в изменении норм для населения. Допустимые концентрации трития в питьевой воде в 2009 г. по сравнению с 1996 г. снизились примерно на один порядок. Особо ошутимы колебания норм по содержанию трития в пище: изменения были в разное время на порядок больше и в разы меньше нынешнего значения. Следует отметить, что нормативные значения по тритию для персонала не пересматривались с 1996 г. В России нормативы ОСТ для населения введены только 1999 г. в ряде стран (США, Франция, Канада и др.) в районах размещения ядерных объектов проводится мониторинг трития с целью оценки значимости ОСТ. В России контроль ОСТ в сбросах и водных объектах не проводится. Распространение техногенного трития в окружающей среде приводит к поступлению и накоплению его в организме человека.

С целью ограничения воздействия АЭС на окружающую среду для каждой станции регламентируются предельно допустимые выбросы (ПДВ) и сбросы (ПДС). Однако следует отметить, что в соответствии с санитарными правилами проектирования и эксплуатации атомных станций СанПиН 2.6.1.24–03 [7], тритий в расчетах допустимых выбросов не учитывается и до настоящего времени его выброс в атмосферу не контролируется [8].

В работе [9] представлены нормативные значения радиологического качества воды по тритию, которые свидетельствуют, что наиболее жесткий норматив установлен в странах ЕС (100 Бк/кг), а допустимые концентрации в России в 76 раз выше значений, рекомендованных ЕС.

О распространении техногенного трития в объектах окружающей среды по цепочке: «хранилище РАО — грунтовые воды — открытые водоемы — питьевая вода» приводятся данные в работе [10]. При этом в основном тритий в этих объектах находится в виде ОСТ: до 80–100%. Наши результаты дальнейших исследований по определению химических форм трития подтвердили, что в различных средах тритий находится как в форме оксида НТО, так и в виде ОСТ (табл. 3).

По данным исследований, выполненных в США, существующие стандарты для питьевой воды в отношении трития не защищают детей и внутриутробный плод в той же мере, что и взрослых. Исследования

Таблица 2

Эволюция нормативов трития

Нормы радиационной безопасности НРБ	Персонал, Бк/кг		Население, Бк/кг			
	Допустимая среднегодовая объемная активность	Предел годового поступления	Допустимая среднегодовая объемная активность	Предел годового поступления, воздух	Вода питьевая	Предел годового поступления. Продукты питания
НРБ-333-60	$7,4 \cdot 10^2$	$1,85 \cdot 10^9$	7,0	$1,9 \cdot 10^7$	$1,1 \cdot 10^4$	$0,9 \cdot 10^7$
НРБ-76	$1,8 \cdot 10^2$	$4,4 \cdot 10^8$	11,0	$4,4 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^5$	$9,6 \cdot 10^7$
НРБ-76/87	$3,7 \cdot 10^2$	$7,4 \cdot 10^8$	5,9	$7,4 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^8$
НРБ-96	НТО		$7,6 \cdot 10^3$	$5,6 \cdot 10^7$	$3,0 \cdot 10^4$	$2,4 \cdot 10^7$
	пар	$4,4 \cdot 10^5$				
	газ	$1,1 \cdot 10^9$				
		$1,1 \cdot 10^{13}$				
НРБ-99	НТО		$1,9 \cdot 10^3$	$3,7 \cdot 10^6$	$7,7 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^7$
	пар	$4,4 \cdot 10^5$				
	газ	$4,4 \cdot 10^9$				
	ОСТ				$3,3 \cdot 10^3$	$8,3 \cdot 10^6$
НРБ-99/2009	НТО		$1,9 \cdot 10^3$	$3,7 \cdot 10^6$	$7,6 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^7$
	пар	$4,4 \cdot 10^5$				
	газ	$4,4 \cdot 10^9$				
	ОСТ					$8,3 \cdot 10^6$

Таблица 3

Соотношение ОСТ и НТО в производственной среде и биопробах, %

№	Проба	Соотношение ОСТ/НТО			
		кол-во	среднее	max	min
1	Воздух (конденсат)	1	99/1		
2	Водные пробы питьевые	2	62/38	66/34	58/42
3	Биопробы	3	91/9	97/3	85/15

Таблица 4

Коэффициент ОБЭ трития

Возрастная группа	Форма трития	Нижний предел	Среднее значение	Верхний предел
Взрослый	НТО	1,2	2,3	3,8
	ОСТ	2,3	5,0	11,6
Внутриутробный плод	НТО	2,1	4,4	8,1
	ОСТ	4,0	9,8	23,1
МКРЗ	НТО		1–3,5	

показали, что используемые в настоящее время в нормативах США коэффициенты для расчета доз облучения тритием для взрослых могут быть в 2–5 раз выше, в зависимости от формы трития, и в 4–10 раз выше для плода, если тритий попадает в организм с пищей [11]. Эти оценки являются предварительными.

В работе [12] приведены результаты анализа биологических экспериментов по определению относительной биологической эффективности ОБЭ оксида трития и ОСТ (табл. 4).

Представленные в табл. 4 данные подчеркивают значимость химической формы трития и возраста человека при облучении. Так, ОБЭ для плода от органически связанного трития более чем в четыре раза превышает ОБЭ для взрослого человека от тритиевой воды и почти в десять раз больше, чем следует из рекомендаций МКРЗ [13].

Разработка нормативных критериев, основанных на зависимости действия радиации от дозы облучения организма в целом или отдельных органов и тканей, предполагает наличие корреляции между этими эффектами. Оценка доз облучения при воздействии трития на клетку и субклеточные структуры является достаточно сложной и до настоящего времени окончательно не решенной задачей.

В работе [14] показано влияние трития на изменение активности трансминазы крови у работников атомного производства. Ранее в работах [15, 16] обобщены результаты оценки ОБЭ бета-излучения трития в группах профессионалов-атомщиков. Авторами проведена оценка относительной биологической эффективности бета-излучения трития в группах профессионалов-атомщиков в отдаленные сроки после облучения по частоте транслокации и по ко-

эффиценту эффективности репаративного синтеза ДНК. Показано, что отношения величин поглощенных доз, вызывающих равный эффект в когортах профессионалов, работавших с гамма-нейтронным (преимущественно с гамма-) и бета-излучением, составляют 3,0–3,3 и превышают значения, полученные *in vitro* по цитогенетическим критериям в диапазоне малых доз. Данные исследований основаны на представлении, что тритий в организме находится в виде НТО. Вместе с тем прогнозируемые дозы облучения работников различных производств, рассчитанные по моделям кинетики ОСТ и НТО при одинаковом поступлении в организм, различаются в 2–2,5 раза ($D_{эфОСТ} = 0,64$ мЗв/год, $D_{эфНТО} = 0,27$ мЗв/год).

К сожалению, действующие модели расчета доз не учитывают дифференцированного депонирования ОСТ и НТО по органам и тканям, в то время как наши исследования показывают, что эффективная доза, обусловленная поступлением ОСТ, может в два и более раз превышать величину, спрогнозированную с помощью действующих моделей расчета дозы.

Заключение. Из представленных материалов следует, что до сих пор нет однозначного понимания в решении проблем нормативного регулирования содержания техногенного трития и его соединений в различных средах, в том числе в оценке доз облучения персонала и населения. В связи с широкомасштабным развитием атомной энергетики и в перспективе термоядерной проблема трития остается значимой вследствие вовлечения все большего числа людей, работающих с его соединениями. Понимая значимость оценки опасности трития и его соединений для населения и персонала, в ФМБЦ им. А. И. Бурназяна проводятся биологические эксперименты для обоснования разрабатываемых нормативов для различных форм соединений трития.

Библиографический список

1. Вакуловский С. М., Катрич И. Ю. Тритий в водных объектах на территории России в 1975–2012 годах // АНРИ. 2013. № 3. С. 38–42.
2. Ивахнюк Г. К., Ахмад И. К., Михальченко А. Г. Перспективы увеличения глобальной радиационной нагрузки от техногенного трития // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы: тезисы науч.-практ. конф. СПб., 2008. С. 232–236.
3. Журавлёв В. Ф. Распределение, биологическое действие и ускорение выведения радиоактивных изотопов / под ред. Ю. И. Москалева. М.: Медицина, 1964. С. 202–209.
4. Калистратова В. С. Радиационная медицина: рук-во / под ред. Л. А. Ильина. М.: ИздАТ. 2004. Т. 1. С. 604–613.
5. Калистратова В. С., Ильин Л. А. Радиационная медицина: рук-во // под ред. Л. А. Ильина. М.: ИздАТ. 2004. Т. 1. С. 631–634.
6. Robin L., Hilland J., Johnson R. Metabolism and dosimetry of tritium // Health Phys. 1993. № 65 (6). P. 628–647.
7. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций: СанПиН 2.6.1.24–03. М., 2003. С. 96.
8. Рязанцев Е. П., Крышев И. И. Оценка риска радиоактивного загрязнения окружающей среды при эксплуатации АЭС // Атомная энергия. 1998. Т. 85, вып. 2. С. 158–164.
9. Canadian Nuclear Safety Commission: Standards and Guidelines for Tritium in Drinking Water, INFO-0766. Ottawa, 2008.
10. К обоснованию контроля органически связанного трития в окружающей среде ядерных установок / Д. И. Каба-

нов, О. А. Кочетков, Г. В. Фомин [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Сер: Термоядерный синтез. 2012. Вып. 1. С. 14–20.

11. Harrison [et al.] Uncertainties In Dose Coefficients For Intakes Of Tritiated Water And Organically-Bound Forms Of Tritium By Members Of The Public // Radiation Protection Dosimetry. 2008. № 98. P. 299–311.
12. Brais S., Torn M., Makhengani A. Science for the Vulnerable: Setting Radiation and Multiple Exposure Environmental Health Standards to Protect Those Most at Risk. IAEA, Washington, 2006. P. 84–88.
13. Публикация 103 Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) 2007 года. М.: ООО ПКФ «Алана», 2009. С. 263.
14. Токарская З. Б., Сурина А. Г., Тельнов В. И. Ферменты и белки сыворотки крови у лиц, работающих в контакте с тритием // Источники и эффекты облучения работников ПО «Маяк» и населения, проживающего в зоне влияния предприятия. М., 2013. Ч. 2. С. 127–131.
15. Т. И. Хаймович, Т. В. Стяжкина, И. А. Великанова [и др.] // Бюллетень радиационной медицины. 1985. № 3. С. 50–54.
16. Snigireva G. P., Khaimovich T. I., Nagiba V. I. Radiatsionnaya Biologiya // Radioekologiya. 2010. Vol. 50, № 6. P. 663–671.

Translit

1. Vakulovskij S. M., Katrich I. Ju. Tritij v vodnyh ob'ektah na territorii Rossii v 1975–2012 godah // ANRI. 2013. № 3. S. 38–42.
2. Ivahnjuk G. K., Ahmad I. K., Mihal'chenko A. G. Perspektivy uvelicheniya global'noj radiacionnoj nagruzki ot tehnogennogo tritija // Servis bezopasnosti v Rossii: opyt, problemy, perspektivy: tezisy nauch.-prakt. konf. SPb., 2008. S. 232–236.
3. Zhuravljov V. F. Raspredelenie, biologicheskoe dejstvie i uskorenie vyvedenija radioaktivnyh izotopov / pod red. Ju. I. Moskaleva. M.: Medicina, 1964. S. 202–209.
4. Kalistratova V. S. Radiacionnaja medicina: ruk-vo / pod red. L. A. Il'ina. M.: IzdAT. 2004. T. 1. S. 604–613.
5. Kalistratova V. S., Il'in L. A. Radiacionnaja medicina: ruk-vo // pod red. L. A. Il'ina. M.: IzdAT. 2004. T. 1. S. 631–634.
6. Robin L., Hilland J., Johnson R. Metabolism and dosimetry of tritium // Health Phys. 1993. № 65 (6). P. 628–647.
7. Sanitarnye pravila proektirovanija i jekspluatcii atomnyh stancij: SanPiN 2.6.1.24–03. M., 2003. S. 96.
8. Rjazancev E. P., Kryshev I. I. Ocenka riska radioaktivnogo zagrjaznenija okruzhajushhej sredy pri jekspluatcii AJeS // Atomnaja jenergija. 1998. T. 85, vyp. 2. S. 158–164.
9. Canadian Nuclear Safety Commission: Standards and Guidelines for Tritium in Drinking Water, INFO-0766. Ottawa, 2008.
10. K obosnovaniju kontrolja organicheski svjazannogo tritija v okruzhajushhej srede jadernyh ustanovok / D. I. Kabanov, O. A. Kochetkov, G. V. Fomin [i dr.] // Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Ser: Termojadernyj sintez. 2012. Vyp. 1. S. 14–20.
11. Harrison [et al.] Uncertainties In Dose Coefficients For Intakes Of Tritiated Water And Organically-Bound Forms Of Tritium By Members Of The Public // Radiation Protection Dosimetry. 2008. № 98. P. 299–311.
12. Brais S., Torn M., Makhengani A. Science for the Vulnerable: Setting Radiation and Multiple Exposure Environmental Health Standards to Protect Those Most at Risk. IAEA, Washington, 2006. P. 84–88.
13. Publikacija 103 Mezhdunarodnoj komissii po radiacionnoj zashhite (MKRZ) 2007 goda. M.: ООО ПКФ «Алана», 2009. S. 263.
14. Tokarskaja Z. B., Surina A. G., Tel'nov V. I. Fermenty i belki sivorotki krovi u lic, rabotajushhih v kontakte s tritиеm // Istochniki i jefekty obluchenija rabotnikov PO «Majak» i naselenija, prozhivajushhego v zone vlijanija predpriyatija. M., 2013. Ch. 2. S. 127–131.
15. T. I. Hajmovich, T. V. Stjazhkina, I. A. Velikanova [i dr.] // Bjulleten' radiacionnoj mediciny. 1985. № 3. S. 50–54.
16. Snigireva G. P., Khaimovich T. I., Nagiba V. I. Radiatsionnaya Biologiya // Radioekologiya. 2010. Vol. 50, № 6. P. 663–671.