

Тритий в моче профессиональных работников ПО «Маяк» в период с 2017 по 2019 г.

В.В. Востротин, А.Ю. Янов, Л.В. Финашов

Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства России, Озёрск, Россия

Цели. Определить уровни объёмной активности соединений трития и долю органических соединений трития в моче у работников химического производства «Производственное объединение «Маяк»» в современных условиях, выявить связь уровней объёмной активности с профессиональной деятельностью (отделением и специальностью). Материалы и методы. В период с 2017 по 2019 г. было собрано 245 анализов мочи 171 работника тритиевого производства Производственного объединения «Маяк». Измерения объёмной активности соединений трития в моче проводилось жидкостно-сцинтилляционным методом с использованием спектрометра Quantulus-1220. В качестве пробоподготовки использовалась дистилляция или сушка пробы с последующим использованием системы пробоподготовки Sample Oxidizer A307. Для статистического анализа при обработке результатов измерений и профессиональных факторов использовалось программное обеспечение «R». Для установления степени корреляционной связи использовалась шкала Чеддока. Уровень значимости был принят равным 5%. Результаты. Значение суммарной объёмной активности трития в моче и объёмной активности трития в водной фазе мочи варьировало в пределах 4 порядков величины (от ~30 Бк/дм³ до ~250 кБк/дм³). Значение объёмной активности органических соединений трития в моче варьировало в пределах 2 порядков величины (от ~6 Бк/дм³ до ~3000 кБк/дм³). Значение доли органических соединений трития в моче профессиональных работников находилось в диапазоне от 0,07% до 74%, при этом статистически значимо не отличалось от логнормального распределения с параметрами: среднее геометрическое = 2,7% и среднее геометрическое отклонение = 3,7. Выявлена весьма высокая ранговая корреляционная связь между суммарной объёмной активностью соединений трития в моче и объёмной активностью трития в водной фазе мочи. Выявлены заметные ранговые корреляционные связи между суммарной объёмной активностью соединений трития в моче и объёмной активностью органических соединений трития мочи, а также между объёмной активностью трития в водной фазе мочи и объёмной активностью органических соединений трития в моче. У работников 1-го цеха и аналитической лаборатории тритиевого производства Производственного объединения «Маяк» суммарный уровень объёмной активности трития в моче и уровень объёмной активности трития в водной фазе мочи по медиане были статистически значимо выше, чем у работников 2-го цеха. Статистически значимые различия между медианами суммарной объёмной активности трития в моче и объёмной активностью трития в водной фазе мочи в зависимости от специальности наблюдались только у работников 1-го цеха. Выводы. Оценивание объёмной активности трития в водной фазе мочи без пробоподготовки по уровню суммарной объёмной активности трития возможно с надёжностью 95% в пределах границ, составляющих один порядок величины относительно модельного значения. Оценивание объёмной активности органических соединений трития в моче без пробоподготовки по уровню суммарной объёмной активности трития возможно с надёжностью 95% в пределах границ, составляющих два порядка величины относительно модельного значения. Обнаружено влияние профессиональных факторов на уровни объёмной активности соединений трития в моче работников химического производства Производственного объединения «Маяк».

Ключевые слова: тритий, проба мочи, объёмная активность, органически связанный тритий, профессиональные факторы, Производственное объединение «Маяк».

Введение

В XX в. промышленное производство трития было освоено всеми странами «ядерной пятёрки» (США, СССР, Великобритания, Франция, Китай). С целью обеспечения индивидуального дозиметрического контроля

внутреннего облучения тритием профессиональных работников на данных производствах были созданы специализированные лаборатории и/или службы, обеспечивающие измерение объёмной активности в пробах мочи персонала, а также интерпретирующие серии этих

Востротин Вадим Владимирович

Южно-Уральский институт биофизики

Адрес для переписки: 456780, Россия, Челябинская область, г. Озёрск, Озёрское шоссе, д. 19; E-mail: vostrotin@subi.su

результатов измерений в виде доз. Анализ уровней объёмной активности (ОА) трития в моче профессиональных работников тритиевого производства SRS, США, в 99,9% не превышающий 740 кБк/дм^3 , проведённый для оценки вариабельности периода полувыведения радионуклида из организма, представлен в работе Butler et al. [1]. Реконструированные оценки доз внутреннего облучения тритием для когорты работников SRS методом JEM (Job Exposure Matrix) представлены в исследовании Namra et al. [2]. Систематический обзор с оценками доз внутреннего облучения профессиональных работников Великобритании и Франции представлен в работе Little et al. [3].

Промышленное производство трития в СССР существовало с момента запуска реактора «АИ» в 1951 г. [4, 5]. Для извлечения трития из литиевых блоков, облученных в атомном реакторе, был создан отдельный химический цех [6]. По данным Гусковой А.К., особенно неблагоприятным с точки зрения радиационных эффектов в данном цехе оказался период становления технологии с 1951 по 1953 г.¹

По данным Третьякова Ф.Д., первые исследования содержания трития в организме персонала были выполнены в 1964–1966 гг. на базе биофизической лаборатории Филиала №1 Института биофизики под руководством Хохрякова В.Ф. Было установлено, что у 20% из 400 обследованных работников ОА трития в моче превышала допустимую $OA=1,1 \text{ МБк/дм}^3$ в 2–20 раз. Среднегодовые эквивалентные дозы внутреннего облучения тритием аппаратчиков перчаточных камер были в 1965–1966 гг. в диапазоне 41–177 сЗв при $ОБЭ=2,5$ (что соответствовало эффективной дозе 160–710 мЗв при $КК=1$). У работников других профессиональных групп эквивалентная доза внутреннего облучения от трития в 1965–1966 гг. в среднем не превышала 5 бэр (или 5 сЗв) в год. В результате проведения защитных радиационно-гигиенических мероприятий уровень годовых эквивалентных доз внутреннего облучения у аппаратчиков перчаточных камер в период с 1971 по 1999 г. уменьшился в ~200 раз и был в среднем от 0,4 сЗв до 0,9 сЗв. У работников других профессиональных групп средняя годовая эквивалентная доза в период с 1971 по 1999 г. уменьшилась в ~10 раз и была в среднем от 0,2 сЗв до 0,4 сЗв.²

В настоящее время производство трития осуществляется на базе химического производства ФГУП «Производственное объединение «Маяк»» (ПО «Маяк») [7], которое для простоты изложения в дальнейшем будет называться тритиевым производством.

В течение последних двух десятилетий среди исследователей наблюдался интерес к определению доли органических соединений трития (ОСТ) в моче профессиональных работников [8,9], моделям поведения трития в организме человека [10–14], а также к оценке вклада органических соединений трития в дозу внутреннего облучения [15–18].

Таким образом, наблюдение за когортой профессиональных работников тритиевого производства ПО «Маяк» в современных условиях является актуальным, направленным как на определение уровней ОА различных соединений трития, в том числе – ОСТ, так и на сопоставление этих уровней с профессиональными факторами.

Цель исследования – определить уровни ОА соединений трития и долю ОСТ у работников химического производства ПО «Маяк» в современных условиях, выявить связь уровней ОА с профессиональной деятельностью (отделением и специальностью).

Задачи исследования

1. Определить уровни и корреляционные соотношения ОА соединений трития в моче работников тритиевого производства.
2. Построить модели взаимных зависимостей ОА различных соединений трития, определить надёжность оценок полученных моделей.
3. Определить влияние профессиональных факторов на уровни ОА соединений трития в моче.

Материалы и методы

В период с 2017 по 2019 г. было собрано 245 анализов мочи 171 работника тритиевого производства ПО «Маяк» (2017 г. – 17 проб, 2018 г. – 116 проб, 2019 г. – 112 проб). На каждого работника было получено информированное согласие и собраны анкетные данные.

Измерения ОА соединений трития в моче проводили жидкостно-сцинтилляционным методом с использованием спектрометра Quantulus-1220.

С целью измерения суммарной ОА трития в моче пробоподготовку не проводили. В вials автоматическим распределителем Dispenser вносили сцинтиллятор OptiPhase HiSafe 3 объемом 12 см^3 и аликвоту пробы объемом 8 см^3 , отобранную дозатором. Вials плотно закрывали крышкой, встряхивали для равномерного распределения жидкостей и помещали для охлаждения и высвечивания при положении регулятора температуры 18°C в измерительное отделение Quantulus-1220, где выдерживали не ме-

¹ Отчёт «Особенности клинической картины лучевого заболевания, вызванного попаданием трития в организм», Филиал № 1 Института биофизики АМН СССР, 1954; А.К. Гускова, «Неврологические синдромы хронической лучевой болезни», диссертация на соискание доктора медицинских наук, Филиал № 1 Института биофизики АМН СССР, 1956 [Report "Characteristic features of clinical presentation of a radiation disease caused by tritium intake", Affiliation №1 of the Biophysics Institute of the USSR Academy of Medical Sciences; A.K. Guskova, "Neurological syndromes of the chronic radiation disease", medical doctorate thesis, Affiliation №1 of the Biophysics Institute of the USSR Academy of Medical Sciences, 1956 (In Russ.)].

² Ф.Д. Третьяков, Е.П. Кондратенко, и А.С. Колесников, «Основные итоги в изучении условий труда в производстве трития», Гигиенические, дозиметрические и медико-биологические аспекты отдаленных эффектов хронического облучения. Труды и материалы. Юбилейная научная конференция «50 лет ЮУрИБФ», 2003 [F.D. Tretyakov, E.P. Kondratenko and A.S. Kolesnikov, "Main outcomes of the study of labour conditions in tritium production", Hygienic, dosimetry and medical-biological aspects of late effects of chronic exposure. Works and material. Anniversary scientific conference "SUBI – 50 years", 2003. (In Russ.)].

нее 12 ч. При определении суммарной ОА трития в моче учитывали гашение, вносимое пробой, приводящее к снижению эффективности регистрации.

Измерения ОА трития в водной фазе мочи (НТО) проводили с помощью аттестованной методики измерения (МИ)³. В начале проводили дистилляцию пробы мочи объемом 30–50 см³. Затем из полученного дистиллята изготавливали счетный образец. Изготовление счетного образца и подготовку его к измерению проводили по аналогии с изготовлением и подготовкой к измерению образца недистиллированной мочи.

Измерения ОА ОСТ в моче проводили с помощью аттестованной методики измерения (Ми).⁴ Пробу мочи объемом 8 см³ последовательно по 1 см³ по мере испарения жидкой фракции наносили на фильтр типа «синяя лента», который находился в вытяжном шкафу. Полученную на фильтре пробу мочи досушивали в сушильном шкафу в течение 4 ч при температуре 75–90°C. Счетный образец получали путем сжигания фильтра с пробой мочи с использованием системы пробоподготовки Sample Oxidizer A307. В ходе процесса сжигания фильтра с пробой мочи тритий, входивший в состав органических соединений, растворялся в сцинтилляторе MonophaseS объемом

15 см³ и поступал в стеклянную вialу. Вialу плотно закрывали крышкой, встряхивали для равномерного распределения жидкостей и помещали для охлаждения и высвечивания в измерительное отделение Quantulus-1220, где выдерживали не менее 12 ч при положении регулятора температуры 18 °C.

Измерения проводили с использованием программного обеспечения WinQ, предназначенного для управления спектрометром Quantulus-1220, в соответствии с руководством по эксплуатации.

Для статистического анализа при обработке результатов измерений и профессиональных факторов использовалось программное обеспечение «R» версии 3.3.3 («Another Canoe»). Для установления статистически значимых различий медиан в группах при влиянии нескольких факторов использовали присоединенный пакет «dunn.test» версии 1.3.5. Для установления степени корреляционной связи использовалась шкала Чеддока. Уровень значимости был принят равным 5%.

Результаты и обсуждение

В таблице 1 представлены статистические характеристики уровней ОА различных соединений трития

Таблица 1

Статистические характеристики числа и результатов измерения ОА соединений трития и доли ОСТ в пробах мочи профессиональных работников ПО «Маяк» в период 2017–2019 гг.

[Table 1

Statistical characteristics of the measurement results of VA of tritium compounds and the OBT fraction in urine samples of the Mayak PA workers in the period of 2017–2019]

Статистическая характеристика [Statistical characteristics]	Тип измерения ОА трития [Type of tritium VA measurement]			Доля ОСТ в моче, % [Fraction of OBT in the urine, %]
	Суммарная ОА, Бк/дм ³ [Total VA, Bq/dm ³]	ОА в водной фазе (НТО), Бк/дм ³ [VA in the water phase (HTO), Bq/dm ³]	ОА ОСТ, Бк/дм ³ [OBT VA, Bq/dm ³]	
	n=237	n=232	n=113	
Минимум [Minimum]	31	27	6	0,07
Максимум [Maximum]	243 000	247 000	3110	74
Среднее [Average]	8460	7530	300	6,1
Среднеквадратическое отклонение [Standard deviation]	22 900	23 100	570	9,7
Медиана [Median]	850	730	101	2,5
Среднее геометрическое (GM) [Geometric mean (GM)]	1 360	1 080	104	2,7
Стандартное геометрическое отклонение (GSD) [Geometric standard deviation (GSD)]	6,4	6,7	4,4	3,7

³ Методика выполнения измерений объемной активности трития в пробах воды и мочи с использованием жидко-сцинтилляционного спектрометра Quantulus-1220. ФГУП «Южно-Уральский институт биофизики». – Озерск, 2016), свидетельство об аттестации МИ № 222.0032/RA.RU.311866/2019 [Methods for measuring the volume activity of tritium in water and urine samples using a Quantulus-1220 liquid scintillation spectrometer; Federal State Unitary Enterprise South Ural Institute of Biophysics. Ozersk, 2016.), certificate of certification No. 222.0032 / RA.RU.311866 / 2019 (In Russ.)].

⁴ Методика измерения объемной активности органических соединений трития в моче. ФГУП «Южно-Уральский институт биофизики». Озерск, 2020), свидетельство об аттестации МИ № 222.0121/RA.RU.311866/2020 [Methods of measuring the volume activity of organic tritium compounds in the urine; Federal State Unitary Enterprise South Ural Institute of Biophysics. Ozersk, 2020.), certificate of certification No. 222.0121/RA.RU.311866/2020 (In Russ.)].

и доли ОСТ в моче профессиональных работников. Из таблицы 1 следует, что как суммарная ОА трития, так и ОА НТО варьировали пределах 4 порядков величины. Максимальное значение ОА трития в водной фазе 250 кБк/дм³ соответствовало мощности эффективной дозы на уровне ~ 4 мЗв/год. Разброс значений ОА ОСТ трития в моче был меньше и составлял 3 порядка величины. Доля ОСТ определялась как отношение ОА ОСТ трития в моче к сумме ОА ОСТ и ОА НТО. Медианное значение доли ОСТ в моче профессиональных работников составляло 2,5%, что было на порядок величины больше величины данного показателя, найденного в исследовании работников тяжеловодных реакторов в Канаде, находившихся в условиях хронического поступления трития [16]. Данное различие можно объяснить отличием в пробоподготовке двух методов измерений: в используемом в настоящем исследовании методе измерения ОСТ в моче могут присутствовать как обменные, так и необменные соединения трития, в то время как в исследовании, проведенном в Канаде, обменные соединения трития удалялись из пробы.

Тест Шапиро – Уилка выявил статистически значимое отличие всех 3 показателей ОА трития в моче: как от нормального, так и от логнормального законов распределений. Распределение доли ОСТ в моче статистически значимо не отличалось от логнормального закона распределения ($W=0,98$, $p=0,46$). В дальнейшем анализе, где это было необходимо, использовались непараметрические тесты.

Изучение взаимосвязей ОА соединений трития в моче работников тритиевого производства

С целью изучения возможности оценки объемной активности ОСТ и НТО в моче профессиональных работников тритиевого производства ПО «Маяк» по результатам измерения суммарной ОА трития в моче, не требующей пробоподготовки, был проведен корреляционный анализ по Спирмену. В результате анализа была выявлена весьма высокая ранговая взаимосвязь между показателями суммарной ОА трития в моче и ОА водной фракции мочи (ОА НТО) $r = 0,95$. Между показателями ОА ОСТ мочи и суммарной ОА трития в моче наблюдался заметный уровень ранговой взаимосвязи, который составил $r = 0,61$. Между показателями ОА ОСТ мочи и ОА НТО в моче также наблюдался заметный уровень ранговой взаимосвязи, который составил $r = 0,60$.

При моделировании зависимостей, вследствие значительного разброса исходных данных использовался логарифмический масштаб их представления и степенная функция вида $Y=a \cdot X^b$. Во всех случаях параметр а статистически значимо не отличался от единицы, поэтому функции имели окончательный вид $Y=X^b$.

На рисунке 1 в логарифмической шкале представлены исходные данные о суммарной ОА трития мочи и ОА НТО с полученной степенной зависимостью $Y=X^{0,973}$ и 95% доверительной областью как линии регрессии, так и значений. Относительная ошибка оценки ОА НТО в моче по суммарной ОА трития в моче в виде стандартного геометрического отклонения составляла 1,86 при стандартном геометрическом отклонении исходных данных ОА НТО, равном 6,7. Т.е. модель могла объяснить исходной дисперсии ОА НТО в моче в логарифмической шкале ($R^2=0,89$). Таким образом, оценивание ОА НТО в моче без пробоподготовки по

уровню суммарной ОА трития возможно с надёжностью 95% в пределах границ, составляющих один порядок величины ($1,86^4$) относительно модельного значения.

На рисунке 2 в логарифмической шкале представлены исходные данные о суммарной ОА трития мочи и ОА ОСТ с полученной степенной зависимостью $Y=X^{0,553}$ и 95% доверительным интервалом как самой функции, так и индивидуальных значений. Относительная ошибка оценки ОА ОСТ в моче по суммарной ОА трития в моче в виде стандартного геометрического отклонения составляла 3,36 при стандартном геометрическом отклонении исходных данных ОА ОСТ, равном 4,4. Т.е. модель могла объяснить исходной дисперсии ОА ОСТ в моче в логарифмической шкале ($R^2=0,33$). Таким образом, оценивание ОА ОСТ в моче без пробоподготовки по уровню суммарной ОА трития возможно с надёжностью 95% в пределах границ, составляющих два порядка величины ($3,36^4$) относительно модельного значения.

В результате анализа была получена аналогичная степенная зависимость $Y=X^{0,568}$ между ОА ОСТ в моче и ОА НТО. Относительная ошибка оценки ОА ОСТ в моче по ОА НТО в виде стандартного геометрического отклонения составляла 3,33 при стандартном геометрическом отклонении исходных данных ОА ОСТ, равном 4,4. Т.е. модель могла объяснить исходной дисперсии ОА ОСТ в моче в логарифмической шкале ($R^2=0,34$). Таким образом, две последние модели обладали приблизительно одинаковым качеством оценки ОА ОСТ.

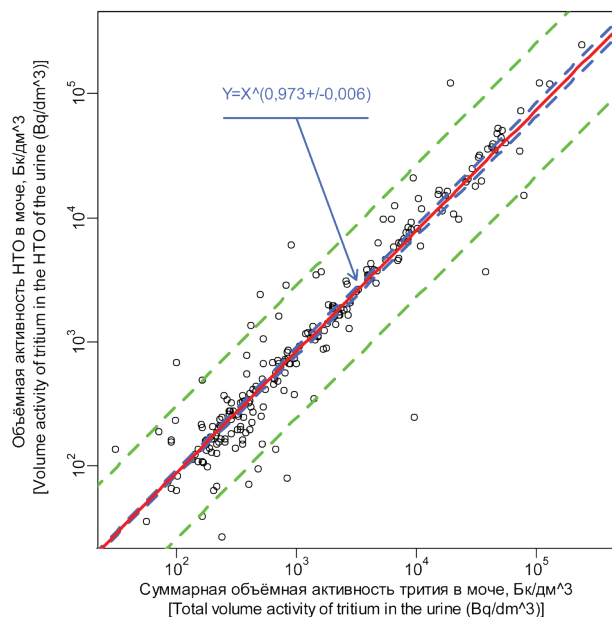


Рис. 1. Степенная зависимость ОА НТО мочи от суммарной ОА трития с 95% доверительной областью линии регрессии (голубая штриховая линия) и 95% доверительной областью значений (зелёная штриховая линия). По оси абсцисс – суммарная объёмная активность трития в моче (Бк/дм³), по оси ординат – объёмная активность трития в водной фракции мочи (Бк/дм³)

[Fig. 1.] Power dependence of VA(HTO) of the urine from the total tritium VA with 95% confidence region of the regression line (blue dashed line) and 95% confidence region of the values (green dashed line). X-axis – Total volume activity of tritium (activity concentration) in the urine (Bq/dm³), Y-axis – Volume activity of tritium in the HTO of the urine (Bq/dm³)

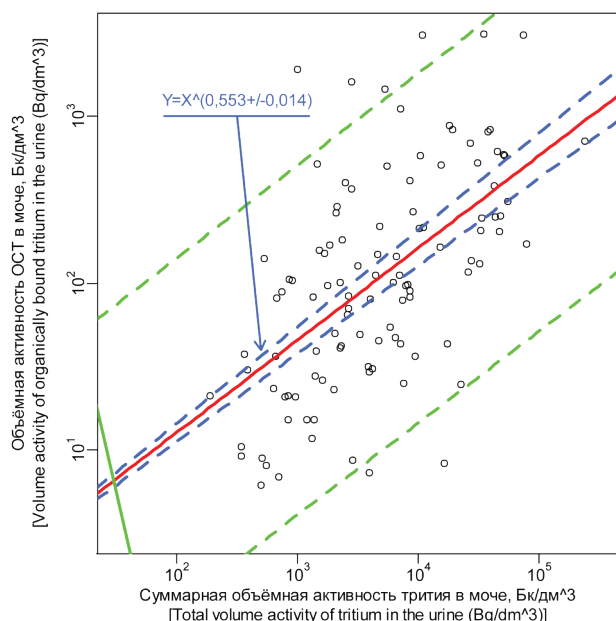


Рис. 2. Степенная зависимость ОА ОСТ в моче от суммарной ОА трития с 95% доверительной областью линии регрессии (голубая штриховая линия) и 95% доверительной областью значений (зелёная штриховая линия). По оси абсцисс – суммарная объёмная активность трития в моче (Бк/дм³³), по оси ординат – объёмная активность органических соединений трития в моче (Бк/дм³³)

[Fig. 2. Power dependence of VA(OBT) from the total tritium VA with 95% confidence region of the regression line (blue dashed line) and 95% confidence region of the values (green dashed line). X-axis – Total volume activity of tritium in the urine (Bq/dm³³), Y-axis – Volume activity of organically bound tritium in the urine (Bq/dm³³)]

Изучение влияния факторов профессиональной деятельности на ОА соединений трития в моче работников тритиевого производства

Перед проведением анализа выборок с результатами измерений ОА соединений трития в моче профессиональных работников ПО «Маяк» они были проверены на однородность по медиане в зависимости от года (табл. 2). Тест Краскела – Уоллиса выявил статистически значимое различие между медианами суммарных ОА трития в моче в зависимости от года (KWCh-sq=6,82, df=2, p=0,03). По тесту Данна статистически значимое различие наблюдалось между медианами суммарной ОА трития в моче в 2017 и 2019 гг. (p=0,01). Статистически значимого различия между медианами ОА трития в водной фазе (KWCh-sq=3,57, df=2, p=0,17) и ОА ОСТ мочи (KWCh-sq=1,81,

df=2, p=0,40) в зависимости от года не наблюдалось. Таким образом, при анализе влияния профессиональных факторов на уровни ОА соединений трития в моче результаты измерений 2017 г. были отброшены.

С целью изучения влияния на ОА трития в моче работников тритиевого производства ПО «Маяк» профессиональных факторов было выделено 3 группы работников отделений предприятия: 1-я группа – работники 1-го цеха, 2-я группа – работники второго цеха, 3-я группа – работники аналитической лаборатории. Также были выделены основные специальности работников в группах – данные, по которым позволяли корректно проводить статистическую обработку результатов измерений. В группу таких специальностей вошли: слесарь-ремонтник, инженер-технолог, электромонтер, аппаратчик. В таблице 3 представлена таблица распределения измерений ОА соединений трития по отделениям и специальностям.

Так как полученные данные об уровнях ОА соединений трития в моче профессиональных работников статистически значимо отличались от нормального распределения, то обработку результатов измерений проводили с использованием непараметрического критерия Краскела – Уоллиса и теста Данна, позволяющего проводить парные сравнения медиан при многофакторном дисперсионном анализе.

По суммарной ОА трития в моче статистически значимые различия в медианах наблюдались у работников исследуемых отделений (KWCh-sq= 14,6, df=2, p=6,6e-4). По тесту Данна были выявлены статистически значимые различия (p=4,4e-4) между медианами суммарной ОА трития у работников 1-го (2100 Бк/дм³³) и 2-го цехов (500 Бк/дм³³), работниками 2-го цеха (500 Бк/дм³³) и аналитической лаборатории (7500 Бк/дм³³) при p=0,015. Между работниками 1-го цеха и аналитической лаборатории статистически значимого различия (p=0,17) по медиане суммарной ОА трития в моче не наблюдалось (рис. 3).

При сравнении ОА НТО в моче также наблюдалось статистически значимое различие медиан (KWCh-sq = 17,7, df = 2, p-value = 1,5e-4). По тесту Данна были выявлены статистически значимые (p=1,0e-4) различия между медианами ОА НТО в моче у работников 1-го (1750 Бк/дм³³) и 2-го цехов (350 Бк/дм³³), работников 2-го цеха (350 Бк/дм³³) и аналитической лаборатории (6100 Бк/дм³³) при p=6,8e-3. Между работниками 1-го цеха и аналитической лаборатории статистически значимого различия (p=0,13) по медиане ОА НТО в моче не наблюдалось.

В дальнейшем были проведены исследования различий медиан ОА соединений трития в моче работников

Таблица 2

Медианы уровней ОА соединений трития в моче профессиональных работников ПО «Маяк» по годам

[Table 2]

Medians of VA levels of tritium compounds in the urine of the Mayak PA workers by years]

Годы [Years]	Суммарная ОА, Бк/дм³³ [Total VA, Bq/dm³³]	ОА в водной фазе (НТО), Бк/дм³³ [VA in the water phase (HTO), Bq/dm³³]	ОА ОСТ, Бк/дм³³ [OBT VA, Bq/dm³³]
2017	5 200 (n=10)*	3 300 (n=17)	100 (n=11)
2018	920 (n=116)*	720 (n=108)	110 (n=49)
2019	740 (n=111)*	670 (n=107)	80 (n=53)

* Статистически значимое различие медиан в группах по тесту Краскела – Уоллиса (p=0,03)

[* Statistically significant difference in group medians by Kruskal-Wallis test (p=0.03)].

Распределения числа измерений ОА соединений трития в моче профессиональных работников ПО «Маяк» по отделениям и специальностям

Таблица 3

[Table 3]

Distributions of measurements of VA of tritium compounds in the urine of the Mayak PA workers by departments and professions]

Специальность [Profession]	Отделение [Department]			Итого [Total]
	1-й цех [1 st department]	2-й цех [2 nd department]	Аналитическая лаборатория [Analytical laboratory]	
Слесарь-ремонтник [Mechanical repairman]	8	31	1	40
Инженер-технолог [Engineering technologist]	10	9	4	23
Электромонтер [Electrician]	5	6	—	11
Аппаратчик [Equipment operator]	33	96	—	129
Итого [Total]	56	142	5	203

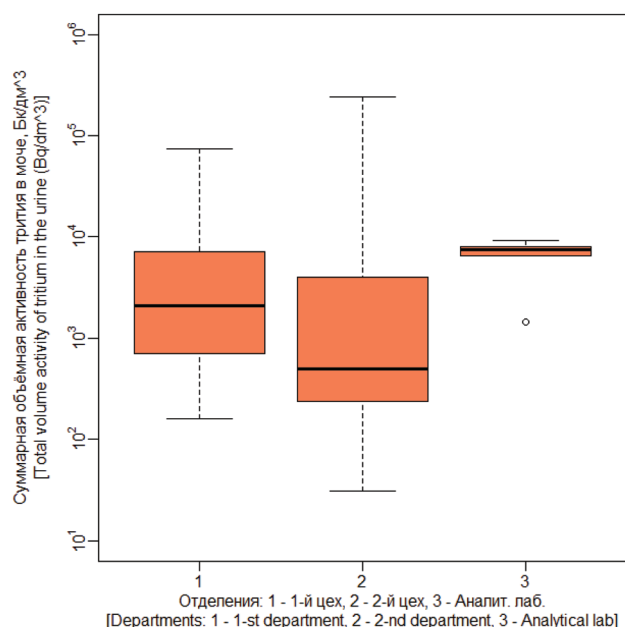


Рис. 3. Сравнение уровней суммарной ОА трития в моче профессиональных работников ПО «Маяк» в период 2018–2019 гг. в зависимости от отделения (Boxplot). По оси абсцисс – отделения, по оси ординат – суммарная объёмная активность трития в моче (Бк/дм³). Точками обозначены статистические выбросы за 99% доверительный интервал

[Fig. 3. Comparison of the total tritium VA in the urine of Mayak PA workers in 2018–2019 in relation to department (Boxplot). X-axis – Departments: 1- 1st department, 2- 2nd department, 3- Analytical laboratory, Y-axis – Total volume activity of tritium in the urine (Bq/dm³). Points are 99% confidence interval outliers]

в каждом из отделений в зависимости от основной специальности. Статистически значимые различия были обнаружены только у работников 1-го цеха. По показателю суммарной ОА трития в моче (KWch-sq=11,5, df= 3, p=0,01) у инженеров-технологов наблюдались более низкие значения медиан в сравнении с аппаратчиками (Dunn test, p=1,4e-3) и слесарями-ремонтниками (Dunn test, p=6,7e-3) (рис. 4).

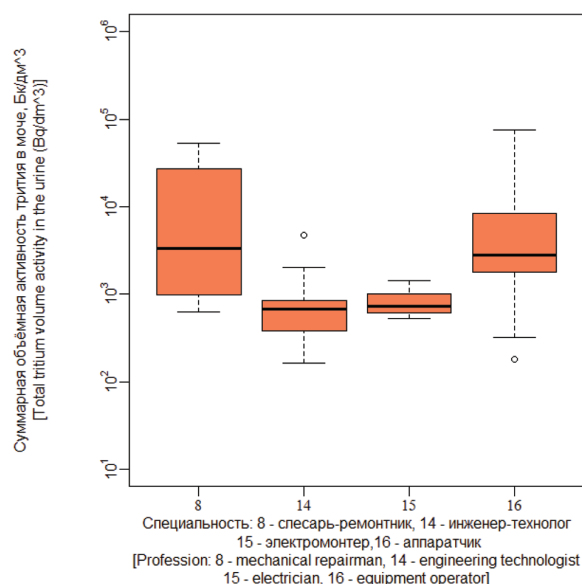


Рис. 4. Сравнение уровней суммарной ОА трития в моче профессиональных работников 1-го цеха ПО «Маяк» в период 2018–2019 гг. в зависимости от специальности (Boxplot). По оси абсцисс – рабочая специальность, по оси ординат – суммарная объёмная активность трития в моче (Бк/дм³). Точками обозначены статистические выбросы за 99% доверительный интервал

[Fig. 4. Comparison of the total tritium VA in the urine of the workers of the 1st department of Mayak PA tritium production in 2018–2019 in relation to profession (Boxplot), X-axis – Profession: 8- mechanical repairman, 14- engineering technologist, 15- electrician, 16- equipment operator, Y-axis – Total tritium VA in the urine (Bq/dm³). Points are 99% confidence interval outliers]

По показателю ОА НТО в моче (KWch-sq=11,1, df= 3, p=0,01) также более низкие медианы наблюдались у инженеров-технологов по сравнению с аппаратчиками (Dunn test, p=8,0e-4) и слесарями-ремонтниками (Dunn test, p=6,6e-3). По показателю ОА ОСТ статистически значимых различий в медианах в зависимости от специальности не наблюдалось.

В других двух отделениях статистически значимых различий между медианами ОА соединений трития в зависимости от основной специальности не наблюдалось.

Заключение

Все показатели ОА соединений трития в моче имели высокую вариабельность по выборке (суммарная ОА – GSD=6,4, ОА НТО – GSD=6,7, ОА ОСТ – GSD=4,4). Распределение показателей ОА соединений трития в моче в большинстве случаев статистически значимо отличалось от законов нормального и логнормального распределений.

Значение доли ОСТ в моче профессиональных работников находилось в диапазоне от 0,07% до 74% и при этом статистически значимо не отличалось от логнормального распределения с параметрами GM=2,7% и GSD=3,7.

Выявлена весьма высокая ранговая корреляционная связь между суммарной ОА соединений трития в моче и ОА НТО в моче профессиональных работников ПО «Маяк». Коэффициент детерминации степенной модели зависимости ОА НТО в моче от суммарной ОА трития составлял $R^2=0,89$ в логарифмическом масштабе. Оценивание ОА НТО в моче без пробоподготовки по уровню суммарной ОА трития возможно с надёжностью 95% в пределах границ, составляющих один порядок величины ($1,86^4$) относительно модельного значения.

Выявлены заметные ранговые корреляционные связи между суммарной ОА соединений трития в моче и ОА ОСТ, а также между ОА НТО и ОА ОСТ в моче профессиональных работников ПО «Маяк». Коэффициенты детерминации степенных моделей зависимости ОА ОСТ в моче от суммарной ОА трития и от ОА НТО составляли $R^2=0,33$ и $R^2=0,34$ в логарифмическом масштабе соответственно. Оценивание ОА ОСТ в моче без пробоподготовки по уровню суммарной ОА трития возможно с надёжностью 95% в пределах границ, составляющих два порядка величины ($3,36^4$) относительно модельного значения.

Обнаружено влияние профессиональных факторов на уровни ОА соединений трития в моче профессиональных работников ПО «Маяк». У работников 1-го цеха и аналитической лаборатории тритиевого производства ПО «Маяк» суммарный уровень ОА трития в моче и ОА НТО в моче по медиане были статистически значимо выше, чем у работников 2-го цеха тритиевого производства.

Статистически значимые различия между медианами суммарной ОА трития в моче и медианами ОА НТО в зависимости от специальности наблюдались только у работников 1-го цеха.

Финансирование

Работа выполнена в рамках Государственного Контракта № 202038810003200000000000/11.311.20.10 от 19 мая 2020 г. «Оценка радиационного риска и разработка мероприятий медико-дозиметрического обеспечения при работе с соединениями трития», шифр «Элемент-20», финансируемого ФМБА России.

Благодарность

Авторы благодарят сотрудников лаборатории № 8 (руководитель Рабинович Е.И.) и клинического отдела (руководитель Азизова Т.В.) ФГУП ЮУРИБФ за помощь в организации и сборе биологических образцов.

Литература

- Butler H.L., Leroy J.H. Observation of biological half-life of tritium // Health Physics. 1965. Vol. 11. P. 283-285.
- Hamra G., Nylander-French L.A., Richardson D. Dose reconstruction for an occupational cohort at the Savannah River nuclear facility: evaluation of a hybrid method. Dose reconstruction for an occupational cohort at the Savannah River nuclear facility // Radiation Protection Dosimetry. 2008. Vol. 131, No. 2. P. 188-197.
- Little M.P., Wakeford R. Systematic review of epidemiological studies of exposure to tritium // Journal of Radiological Protection: Official Journal of the Society for Radiological Protection. 2008. Vol. 28, No. 1. P. 9-32.
- Новоселов В.Н. Нарращивание мощностей производства плутония и трития на ПО «Маяк» в условиях холодной войны (1948-1950-е гг.) // Социум и Власть. 2012. № 3 (35). С. 121-123.
- Kruglov A. The History of the Soviet Atomic Industry. CRC Press, 2002.
- Киселев Г., Ткач К. Литий, дейтерий и тритий для водородной бомбы // Бюллетень по атомной энергии. 2004. № 11. С. 70-76.
- Новоселов В.Н., Носач Ю.Ф., Ентяков Б.Н. Атомное сердце России. Челябинск: Автограф, 2014. 528 с.
- Trivedi A., Duong T., Leon J.W., Linauskas S.H. Measurement of organically bound tritium in urine and feces. AECL-10925. Atomic Energy of Canada Limited, 1993. 29 p.
- Gonen R., Marco R., German U., et al. An improved method for Organic Bound Tritium (OBT) determination in urine samples // Radiation Protection Dosimetry. 2007. Vol. 125, No. 1-4. P. 460-464.
- Galeriu D., Takeda H., Melintescu A., Trivedi A. Energy Metabolism and Human Dosimetry of Tritium // Fusion Science and Technology. 2005. Vol. 48, No 1. P. 795-798.
- Galeriu D., Melintescu A., Beresford N.A., Takeda H., Crout N.M.J. The dynamic transfer of ^3H and ^{14}C in mammals: a proposed generic model // Radiation and Environmental Biophysics. The dynamic transfer of ^3H and ^{14}C in mammals. 2009. Vol. 48, No. 1. P. 29-45.
- Galeriu D., Melintescu A. Retention of tritium in reference persons: a metabolic model. Derivation of parameters and application of the model to the general public and to workers. Retention of tritium in reference persons // Journal of Radiological Protection. 2010. Vol. 30, No. 3. P. 445-468.
- Richardson R.B., Dunford D.W. A biochemical-based model for the dosimetry of dietary organically bound tritium-Part 1: Physiological criteria // Health Physics. 2003. Vol. 85, No. 5. P. 523-538.
- Richardson R.B., Dunford D.W. A biochemical-based model for the dosimetry of dietary organically bound tritium-Part 2: Dosimetric evaluation // Health Physics. 2003. Vol. 85, No. 5. P. 539-552.
- Trivedi A., Galeriu D., Richardson R.B. Dose contribution from metabolized organically bound tritium after acute tritiated water intakes in humans // Health Physics. 1997. Vol. 73, No. 4. P. 579-586.
- Trivedi A., Galeriu D., Lamothe E.S. Dose contribution from metabolized organically bound tritium after chronic tritiated water intakes in humans // Health Physics. 2000. Vol. 78, No. 1. P. 2-7.
- Балонов М.И., Чипига Л.А. Оценка дозы от поступления окиси трития в организм человека: роль включения трития в органическое вещество тканей // Радиационная Гигиена. 2016. Т. 9, № 4. С. 16-25.
- United Nations, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Sources, effects and risks of ionizing radiation: UNSCEAR 2016 report to the General Assembly, with scientific annexes. Sources, effects and risks of ionizing radiation. 2017.

Поступила: 09.10.2020 г.

Востротин Вадим Владимирович – кандидат биологических наук; заведующий лабораторией радиационной безопасности, Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства России. **Адрес для переписки:** 456780, Россия, Челябинская область, г. Озёрск, Озёрское шоссе, д. 19; E-mail: vostrotin@subi.su

Янов Александр Юрьевич – кандидат биологических наук; научный сотрудник лаборатории радиационной безопасности, Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства России, Озёрск, Россия

Финашов Леонид Викторович – научный сотрудник лаборатории радиационной безопасности, Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства России, Озёрск, Россия

Для цитирования: Востротин В.В., Янов А.Ю., Финашов Л.В. Тритий в моче профессиональных работников ПО «Маяк» в период с 2017 по 2019 г. // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 1. С. 102-110. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-102-110

Tritium in the urine of the Mayak PA workers in the period from 2017 to 2019

Vadim V. Vostrotin, Aleksandr Yu. Yanov, Leonid V. Finashov

Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency of Russia, Ozersk, Russia

Objectives. To define the levels of volume activity of tritium compounds and fraction of organically bound tritium in urine of chemical production workers of “Mayak Production Association” in present-day conditions; to identify the relationship between volume activity levels and professional occupation (department and profession). Material and methods. 245 urine samples from 171 workers of Mayak Production Association tritium production facility were collected in the period from 2017 to 2019. Volume activity of tritium compounds was measured by liquid scintillation method using spectrometer Quantulus-1220. The samples were distilled or dried and then combusted using an automatic preparation and oxidization system Sample Oxidizer A307. The “R” software was used for statistical analysis and for processing the measurement results and occupational factors. Chaddok’s scale was applied to determine the degree of correlation. The significance level was taken equal to 5%. Results. The value of total tritium volume activity in the urine and tritium volume activity in the water phase varied within 4 orders of magnitude (from ~30 Bq/dm³ to ~250 kBq/dm³). The value of volume activity of organically bound tritium in the urine varied within 2 orders of magnitude (from ~6 Bq/dm³ to ~3000 kBq/dm³). The fraction of organically bound tritium in the urine of the workers was within the range from 0,07% to 74%, and did not differ statistically significantly from lognormal distribution with parameters GM=2,7% and GSD=3,7. Very high rank correlation was detected between total volume activity of tritium compounds and tritium volume activity in the water phase in the urine. Noticeable rank correlations were detected between the total volume activity of tritium compounds in the urine and volume activity of organically bound tritium, as well as between tritium volume activity in the water phase and volume activity of organically bound tritium in the urine. The total tritium volume activity and tritium volume activity in the water phase in the urine of the workers of the 1st department and of the analytical laboratory of Mayak Production Association tritium production facility were statistically significantly higher than in the workers of the 2nd department according to median values. Statistically significant differences between medians of the total tritium volume activity in the urine and tritium volume activity in the water phase related to profession were observed only in the workers in the 1st department. Conclusion. Estimation of tritium volume activity in the water phase by the level of total tritium volume activity in the urine without sample preparation is possible with 95% reliability within limits of one order of magnitude towards the model value. Estimation of volume activity of organically bound tritium in the urine without sample preparation by the level of total tritium volume activity in the urine without sample preparation is possible with 95% reliability within limits of two orders of magnitude towards the model value. The effect of occupational factors to the levels of volume activity of tritium compounds in the urine of Mayak Production Association professional workers was detected.

Key words: tritium, urine sample, volume activity, organically bound tritium, occupational factors, Mayak Production Facility.

Vadim V. Vostrotin

Southern Urals Biophysics Institute

Address for correspondence: Ozerskoe shosse, 19, Ozersk, 456780, Chelyabinsk region, Russia; E-mail: vostrotin@subi.su

References

- Butler HL, Leroy JH. Observation of biological half-life of tritium. *Health Physics*. 1965 Apr;11: 283–5.
- Hamra G, Nylander-French LA, Richardson D. Dose reconstruction for an occupational cohort at the Savannah River nuclear facility: evaluation of a hybrid method. *Radiation Protection Dosimetry*. 2008;131(2): 188–97.
- Little MP, Wakeford R. Systematic review of epidemiological studies of exposure to tritium. *Journal of Radiological Protection*. 2008 Mar; 28(1): 9–32.
- Novoselov VN. Extending plutonium and tritium production capacities at Mayak PA in the cold war (1948-1950-ies). *Sotsium i Vlast = Society and Authority*. 2012;3(35): 121-123. (In Russian).
- Kruglov A. The History of the Soviet Atomic Industry. CRC Press; 2002.
- Kiselev G, Tkach K. Lithium, deuterium and tritium for the hydrogen bomb. *Byulleten po atomnoy energii = Atomic energy report*. 2004;(11): 70–6. (In Russian).
- Novoselov VN, Nosach YuF, Entyakov BN. Atomic heart of Russia. Chelyabinsk: Authograph; 2014. 528 p. (In Russian).
- Trivedi A, Duong T, Leon JW, Linauskas SH. Measurement of organically bound tritium in urine and feces. Atomic Energy of Canada Limited; 1993. 29 p.
- Gonen R, Marco R, German U, Katorza E, Alfassi ZB, Haquin G, et al. An improved method for Organic Bound Tritium (OBT) determination in urine samples. *Radiation Protection Dosimetry*. 2007 Jul 1;125(1–4): 460–4.
- Galeriu D, Takeda H, Melintescu A, Trivedi A. Energy Metabolism and Human Dosimetry of Tritium. *Fusion Science and Technology*. 2005; 48(1):795–8.
- Galeriu D, Melintescu A, Beresford NA, Takeda H, Crout NMJ. The dynamic transfer of ^3H and ^{14}C in mammals: a proposed generic model. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2009 Feb;48(1): 29–45.
- Galeriu D, Melintescu A. Retention of tritium in reference persons: a metabolic model. Derivation of parameters and application of the model to the general public and to workers. *Journal of Radiological Protection*. 2010 Sep;30(3): 445–68.
- Richardson RB, Dunford DW. A biochemical-based model for the dosimetry of dietary organically bound tritium--Part 1: Physiological criteria. *Health Physics*. 2003 Nov;85(5): 523–38.
- Richardson RB, Dunford DW. A biochemical-based model for the dosimetry of dietary organically bound tritium--Part 2: Dosimetric evaluation. *Health Physics*. 2003 Nov;85(5): 539–52.
- Trivedi A, Galeriu D, Richardson RB. Dose contribution from metabolized organically bound tritium after acute tritiated water intakes in humans. *Health Physics*. 1997 Oct;73(4): 579–86.
- Trivedi A, Galeriu D, Lamothe ES. Dose contribution from metabolized organically bound tritium after chronic tritiated water intakes in humans. *Health Physics*. 2000 Jan;78(1): 2–7.
- Balonov MI, Chipiga LA. Estimation of the dose from tritium oxide intake in human body: the role of inclusion of tritium into organic compound of the tissues. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene* 2016;9(4): 16–25. (In Russian).
- United Nations, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Sources, effects and risks of ionizing radiation: UNSCEAR 2016 report to the General Assembly, with scientific annexes. Sources, effects and risks of ionizing radiation. 2017.

Received: October 09, 2020

For correspondence: Vadim V. Vostrotin – PhD, head of the laboratory of the radiation protection of Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency of Russia (Ozerskoe shosse, 19, Ozersk, 456780, Chelyabinsk region, Russia; E-mail: vostrotin@subi.su)

Aleksandr Yu. Yanov – кандидат биологических наук; Scientist, laboratory of radiation protection of Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency of Russia, Ozersk, Russia

Leonid V. Finashov – Junior scientist, laboratory of the radiation protection of Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency of Russia, Ozersk, Russia

For citation: Vostrotin V.V., Yanov A.Yu., Finashov L.V. Tritium in the urine of the Mayak PA workers in the period from 2017 to 2019. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No. 1. P. 102-110. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-102-110